Editorial Universidad de Antioquia

Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra

Respuestas ante fallas eléctricas y rayos

Germán Moreno Ospina
Jaime Alejandro Valencia Velásquez
Carlos Alberto Cárdenas Agudelo
Walter Mauricio Villa Acevedo

Ciencia y Tecnología

Copyrighted material

Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra

Respuestas ante fallas eléctricas y rayos

Germán Moreno
Jaime Alejandro Valencia
Carlos Alberto Cárdenas
Walter Mauricio Villa

Ciencia y Tecnología
Editorial Universidad de Antioquia

Copyrighted material

Ciencia y Tecnología
© Germán Moreno Ospina, Jaime Alejandro Valencia Velásquez, Carlos Alberto Cárdenas Agudelo, Walter Mauricio Villa Acevedo
© Grupo de Investigación en Manejo Eficiente de la Energía Eléctrica —GIMEL—
© Editorial Universidad de Antioquia
ISBN: 978-958-714-057-6

Primera edición: septiembre de 2007
Diseño de cubierta: Luisa Fernanda Bernal Bernal, Imprenta Universidad de Antioquia
Corrección de estilo: Juan Fernando Saldarriaga
Diagramación: Marcela María Mejía y Luz Elena Ochoa
Impresión y terminación: Imprenta Universidad de Antioquia
Coordinación editorial: Gonzalo Montoya Velásquez

Impreso y hecho en Colombia / Printed and made in Colombia

Prohibida la reproducción total o parcial, por cualquier medio o con cualquier propósito, sin la autorización escrita del editor

Editorial Universidad de Antioquia
Teléfono: (574) 210 50 10. Telefax: (574) 210 50 12
E-mail: mercadeo@editorialudea.com
Sitio web: www.editorialudea.com
Apartado 1226. Medellín. Colombia

Ficha bibliográfica: véase página IV.

El contenido de la obra corresponde al derecho de expresión del autor y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia, ni desata su responsabilidad frente a terceros. El autor asume la responsabilidad por los derechos de autor y conexos contenidos en la obra, así como por la eventual información sensible publicada en ella.

El uso de nombres descriptivos generales, marcas registradas y otros identificadores comerciales en esta publicación, no deberá tomarse como indicación de que dichos nombres y los productos correspondientes puedan ser usados libremente.

Copyrighted material

Contenido

Los autores xv

Prefacio xvii

1 Introducción: importancia y fundamentos de la ingeniería de las puestas a tierra 1

1.1 Importancia de las puestas a tierra y de su conocimiento 1
1.1.1 En las empresas de energía y otras grandes empresas 1
1.1.2 En empresas e instalaciones usuarias de la red eléctrica 2
1.2 Objetivos del sistema de puesta a tierra 3
1.3 Definición del problema 4
1.4 Puesta a tierra de los sistemas de potencia 6
1.5 Esquemas de conexión a tierra 8
1.6 Normatividad actual en Colombia 10
1.7 Puesta a tierra en sistemas DC 11
1.8 Conclusión 12
1.9 Referencias bibliográficas 12

2 Parámetros eléctricos del suelo 13

2.1 Resistividad del suelo 14
2.1.1 Tipo de suelo 15
2.1.2 La humedad y salinidad del suelo 16
2.1.3 La compactación del suelo 17
2.1.4 La temperatura del suelo 17
2.2 La permitividad eléctrica o constante dieléctrica (ε) 18
2.3 La permeabilidad magnética (μ) 19
2.4 Parámetros eléctricos en función de la frecuencia 19
2.5 Referencias bibliográficas 19

Copyrighted material

3 Medición de resistividad y modelación del suelo 22
3.1 Resistividad aparente 23
3.2 Método de Wenner 23
3.3 Método de Schlumberger-Palmer 24
3.4 Método de medición de resistencia de puesta a tierra de un electrodo vertical 25
3.5 Método de medición de resistencia de electrodos ya enterrados 26
3.6 Procedimientos de medición 27
3.7 Precauciones en la medición 28
3.8 Medición de parámetros eléctricos del suelo en función de la frecuencia 28
3.8.1 Modelos circuitales de parámetros concentrados 30
3.9 Interpretación de las medidas. Modelos de suelo 35
3.9.1 Suelo homogéneo 36
3.9.2 Suelo a dos capas horizontales 36
3.9.3 Relación entre ρ_a (Wenner) y los parámetros del suelo a dos capas 37
3.9.4 Otros modelos de suelos 38
3.10 Ejemplo de aplicación 38
3.10.1 Cálculo de la resistividad de un suelo homogéneo por el método de Box-Cox 38
3.10.2 Modelo de dos capas 39
3.11 Aplicaciones de inteligencia artificial en los sistemas de puesta a tierra 39
3.11.1 Estimación de los parámetros del suelo de dos capas con algoritmos genéticos 39
3.11.2 Resultados 41
3.12 Redes neuronales artificiales para cálculo de parámetros eléctricos del suelo en función de la frecuencia 44
3.12.1 Resultados con RNA 46
3.13 Referencias bibliográficas 47

4 Impedancia de puesta a tierra 50
4.1 Resistencia de puesta a tierra 50
4.2 Impedancia de puesta a tierra 52
4.3 Síntesis de circuitos equivalentes de puestas a tierra 54
4.3.1 Metodología para obtener el circuito equivalente 56
4.4 Ionización del suelo 57
4.4.1 Interpretación del fenómeno 58
4.5 Referencias bibliográficas 60

5 Mediciones de resistencia e impedancia de puesta a tierra, y de tensiones de contacto y de paso 62
5.1 Métodos de medición de resistencia de puesta a tierra 62
5.1.1 Método de los dos puntos 62

Copyrighted material

5.1.2 Método de los tres puntos 63
5.1.3 Método de la caída de potencial 64
5.1.4 Medición con pinza 64
5.2 Medición de impedancia a tierra para grandes sistemas de puesta a tierra 65
5.2.1 Corrección de la impedancia mutua 67
5.2.2 Error en la medida por el acoplamiento mutuo AC 68
5.2.3 Acoplamiento mutuo en terminales de potencial por la longitud de los conductores puestos a tierra 68
5.3 Precauciones antes de las mediciones y durante ellas 69
5.4 Consideraciones generales acerca de los problemas relacionados con las mediciones 69
5.4.1 Electrodos utilizados en la medición 70
5.4.2 Corrientes DC espurias 71
5.4.3 Corrientes AC espurias 71
5.4.4 Acoples entre el cableado de la prueba 71
5.4.5 Condiciones del terreno 71
5.5 Equipos de medición 72
5.6 Ejemplo de recursos de medición en puestas a tierra interconectadas 72
5.7 Medición de las tensiones de contacto y de paso 74
5.7.1 Método 1: simulación de los pies utilizando pesas (footprint electrode method) 74
5.7.2 Método 2: utilización de electrodos para la medición de tensiones (test-probe method) 75
5.7.3 Método 3: simulación del personal en el área de interés (simulated personnel method) 76
5.8 Referencias bibliográficas 76

6 Análisis de fallas y corriente a tierra 78
6.1 Representación de sistemas 78
6.2 Concepto de corrientes simétricas y asimétricas 80
6.2.1 Cálculo de corrientes simétricas y asimétricas 82
6.2.2 Factor de decremento 84
6.3 Clasificación de fallas 86
6.4 Diferentes puestas a tierra de los sistemas eléctricos 89
6.5 Cálculo de corrientes de falla 90
6.5.1 Componentes simétricas* 91
6.5.2 Ejemplo de aplicación de las componentes simétricas en cálculo de cortocircuito 94
6.6 Evaluación de corrientes a tierra 97
6.6.1 Metodología de cálculo 100
6.7 Referencias bibliograficas 107

7 Aspectos de seguridad humana. Tensiones tolerables 108
7.1 Efectos de la corriente en el cuerpo humano 109

Copyrighted material

7.2 La impedancia del cuerpo humano 112
7.3 Tensiones tolerables 114
7.3.1 Tensiones de paso 115
7.3.2 Tensiones de contacto 117
7.3.3 Tensiones transferidas 118
7.3.4 Perfiles de tensión y tensiones de paso y de contacto 118
7.3.5 Tensiones permisibles de contacto y de paso 118
7.3.6 Aplicación de una capa superficial de alta resistividad 121
7.4 Referencias bibliográficas 122

8 Mallas de puesta a tierra 124
8.1 Componentes esenciales del diseño de puestas a tierra 124
8.2 La metodología de cálculo de la norma IEEE Std 80 125
8.2.1 Cálculo de la sección del conductor 126
8.2.2 Evaluación de la tensión de retículo (mesh voltage), E_m 127
8.2.3 Evaluación de la tensión de paso (step voltage), E_s 129
8.2.4 Algoritmo de diseño según IEEE Std 80 129
8.2.5 Aplicación de las ecuaciones simplificadas para E_m y E_s 131
8.3 Consideraciones de construcción 133
8.3.1 Introducción 133
8.3.2 Selección de materiales 133
8.4 Referencias bibliográficas 141

9 Cálculo moderno de comportamiento de puestas a tierra 142
9.1 Metodología de segmentación, potencial promedio y teoría de imágenes 142
9.1.1 Distribución de corriente en un conductor enterrado y segmentación analítica 142
9.1.2 Potencial asociado a una inyección de corriente. Potencial promedio 143
9.1.3 Consideración de medio semi-infinito o estratificado: teoría de imágenes 145
9.1.4 Cálculo de la resistencia de puesta a tierra 148
9.1.5 Cálculo de perfiles de tensión y de las tensiones de contacto y de paso 149
9.2 Programa MATTER y ejemplos de aplicación 150
9.2 Referencias bibliográficas 153

10 Respuesta transitoria de las puestas a tierra 160
10.1 Variación de los parámetros del suelo con la frecuencia 160
10.2 Formulación del modelo de base electromagnética 161
10.2.1 Metodología de segmentación e imágenes 161
10.2.2 Matrices de impedancias transversales y longitudinales 162
10.2.3 El efecto de la propagación 164
10.2.4 Relaciones de tensión y corriente entre los segmentos 164

Copyrighted material

10.2.5 Cálculo de la impedancia a tierra en el dominio de la frecuencia 165
10.2.6 Evaluaciones en el domino del tiempo 165
10.2.7 Ampliación del modelo para dos medios (tierra y aire) 166
10.3 *Software* GTIERRAS y ejemplos de aplicación 167
10.3.1 Modelación de torres de transmisión 171
10.3.2 Conclusiones 172
10.4 Referencias bibliográficas 173

Glosario 181

Anexo 187
A.1 Expresiones analíticas para el cálculo de resistencias a tierra de electrodos complejos (mallas) 187
A.2 Referencias bibliográficas 188

Índice analítico 189

Copyrighted material

Copyrighted material

Los autores

Germán Moreno Ospina

Fue profesor de planta del programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Antioquia, desde octubre de 1981 hasta diciembre de 2006. Obtuvo la categoría de profesor titular y recibió distinciones como la de "Maestro de Ingenieros", por el Consejo de la Facultad de Ingeniería, en 2000, y la de "Profesor Distinguido", por el Consejo Superior Universitario, en 1995. Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Colombia, en 1979; magíster y doctor de la Universidad Federal de Río de Janeiro, en 1987 y 1998, respectivamente. Investigador fundador del Grupo de Investigación en Manejo Eficiente de la Energía Eléctrica (GIMEL), que coordinó hasta inicios de 2007 y del cual sigue siendo investigador activo. Ha publicado en revistas y eventos nacionales e internacionales más de cincuenta artículos sobre los temas de puestas a tierra, campos electromagnéticos de redes, gestión tecnológica y educación en ingeniería. Es par evaluador de Colciencias y del Ministerio de Educación Nacional, como también de artículos y proyectos de universidades, eventos y revistas, en el país y en el exterior. Actualmente continúa vinculado a la U. de A., dictando cursos en pregrado y posgrado; dirige o participa en varios proyectos de investigación, tanto internos como para importantes empresas del sector eléctrico, y lidera un proyecto de empresa derivada de actividades de investigación.

Jaime Alejandro Valencia Velásquez

Doctor en ingeniería electromecánica de la Universidad Politécnica de Cataluña, España en 1998; magíster en matemáticas de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, en 1998; ingeniero electricista de la Universidad Nacional de Colombia, en 1982. Profesor de la Facultad de Ingeniería desde 1990 e integrante del grupo GIMEL desde sus inicios.

Copyrighted material

Carlos Alberto Cárdenas Agudelo

Ingeniero electricista de la Universidad de Antioquia. Integrante del grupo GIMEL. Docente de cátedra del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Antioquia. Miembro de los comités de Puestas a tierra y Protección contra Rayos del Icontec. Consultor y conferencista en los temas de sistemas de puesta a tierra y de protección contra rayos para empresas como Ecopetrol, Empresas Públicas de Medellín, Sena, Camacol, entre otras, Integrante del equipo de trabajo en el proyecto "Metodología de manejo de puestas a tierra de líneas de transmisión ante fallas a tierra y descargas eléctricas atmosféricas". Integrante del equipo de investigación en el proyecto "Análisis y desarrollo de criterios de normalización del sistema de puesta a tierra en distribución".

Walter Mauricio Villa Acevedo

Ingeniero electricista de la Universidad de Antioquia. Integrante del grupo GIMEL. Estudiante en formación en el proyecto "Modelación de puestas a tierra para evaluación sobre tensiones transitorias" y joven investigador en "Metodología de manejo de puestas a tierra de líneas de transmisión ante fallas a tierra y descargas eléctricas atmosféricas". Integrante del equipo de investigación en el proyecto "Análisis y desarrollo de criterios de normalización del sistema de puesta a tierra en distribución". Áreas de interés: sistemas de puesta a tierra, compatibilidad electromagnética, sistemas inteligentes en sistemas de potencia eléctrica y sistemas de potencia.

Copyrighted material

Prefacio

Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra: Respuestas ante fallas eléctricas y rayos es el resultado de más de una década de trabajo de integrantes del Grupo de Manejo Eficiente de la Energía (GIMEL),* de la Universidad de Antioquia (U. de A.). Recoge una historia que en buena medida se inicia con la tesis de maestría que presenté ante la Universidad Federal de Río de Janeiro en 1987, en la cual fue desarrollada la parte troncal del programa Matier, luego complementado en partes importantes en un proyecto de investigación de la U. de A., con participación de Interconexión Eléctrica S.A. (ISA), entre 1989 y 1990. Más tarde y de manera muy irregular, fueron participando en estudios de puestas a tierra otros profesores y estudiantes del programa de Ingeniería eléctrica, bien en trabajos de aplicación, bien en trabajos de grado, creándose de forma un tanto espontánea una línea de trabajo que posteriormente haría parte de una de las líneas de investigación del GIMEL, la de compatibilidad electromagnética.

El GIMEL se constituye formalmente en la segunda mitad de 1996 y va definiendo sus líneas de investigación a lo largo de una década. Hacia el año 1998 se establece también una actividad de extensión, que adquiere un carácter sostenido y en ascenso principalmente desde que Carlos Cárdenas asume su liderazgo. Por esta época nace lo que puede considerarse el primer borrador de este libro, en la forma de notas del curso "Puestas a tierra en sistemas eléctricos de distribución", dictado a un número importante de ingenieros de Empresas Públicas de Medellín (EEPPM).

Otro hito en esta historia son dos proyectos de investigación financiados por el Comité de Desarrollo de la Investigación (CODI), de la U. de A., que cuentan con una participación destacadísima de Héctor David Gómez y Esteban Velilla, inicialmente

---

* Desde sus inicios, el grupo se denominó Grupo de Investigación en Manejo Eficiente de la Energía Eléctrica, con la sigla GIMEL. En la actualidad está formalizando el cambio de nombre a Grupo de manejo eficiente de la energía, en atención a que cuenta con una fuerte línea de investigación en máquinas térmicas y se prevé la creación de nuevas líneas no eléctricas. La sigla GIMEL se mantiene.

Copyrighted material

como estudiantes y luego como ingenieros "Jóvenes investigadores".** Estos proyectos dejan como producto el *software* GTIERRAS, que hoy es una herramienta intensamente utilizada por el GIMEL en análisis de comportamientos y diseño de protecciones ante rayos. Por su parte, Walter Villa lidera la utilización de técnicas de inteligencia artificial en los estudios de puestas a tierra y en este libro se ilustra la aplicación de las redes neuronales artificiales a la caracterización de los parámetros del suelo con la frecuencia. Andrés Vanegas hace aportes en algunos módulos de GTIERRAS y en la síntesis de circuitos equivalentes de puestas a tierra. Y en todas las actividades descritas, Jaime Valencia hace permanentes aportes al *troubleshooting* de los desarrollos y orienta varios de ellos.

Continuar con detalles de participaciones en el trabajo sobre el cual se basa este libro obliga a mencionar a los profesores Fernando Gallego y Diego Cadavid, a los ingenieros Eduin García y Luis A. Hernández, y también a muchos estudiantes que en trabajos de grado, en participaciones en grupos de trabajo del GIMEL y en servicios de ingeniería, e incluso en trabajos de curso,*** hicieron aportes que hoy capitalizamos en el libro que presentamos a la ingeniería nacional e internacional.

De lo anterior se evidencia que, en el fondo, este libro es una producción colectiva, aunque algunos hayamos asumido responsabilidades específicas para la elaboración del mismo. La responsabilidad global y la coordinación del material de esta publicación las he asumido, por cierto, con gran placer. Jaime Valencia fue el encargado del capítulo 6, "Análisis de fallas y corriente a tierra"; Carlos Cárdenas ha hecho sus aportes en los temas de mediciones y en aplicaciones a diseño, específicamente en las secciones 1.5, "Esquemas de conexión a tierra"; 1.6, "Normatividad actual en Colombia"; 3.3 a 3.8 y 3.11, sobre medición de resistividad y de resistencia a tierra; en el capítulo 5, "Mediciones de resistencia e impedancia de puesta a tierra, y de tensiones de contacto y de paso"; la sección 8.4, "Consideraciones de construcción"; y el 9.2, sobre el programa Matier y ejemplos de aplicación. Walter Villa, además de haber apoyado numerosas actividades de recopilación, simulación y análisis, ha asumido las secciones 3.9, "Medición de parámetros eléctricos del suelo en función de la frecuencia"; y 3.12, "Aplicaciones de inteligencia artificial en los sistemas de puesta a tierra".

La estructura que definimos para el libro parte en el capítulo 1, de una introducción que ubica la importancia de los sistemas de puesta a tierra, los fundamentos más básicos del problema de la conducción de corrientes por tierra y de las configuraciones circuitales más representativas de los sistemas eléctricos que involucran puestas a tierra. En el capítulo 2 se consideran los parámetros que determinan el comportamiento electromagnético del suelo. El capítulo 3 aboca la medición de la resistividad del suelo y los modelos que se derivan para el cálculo de las puestas a tierra. En los capítulos 4 y 5 se profundiza en los conceptos de *resistencia* e *impedancia*

** Denominación de jóvenes profesionales de reciente graduación, según un programa de Colciencias que apoya pasantías por un año en grupos de investigación.

*** Uno de los productos de la actividad descrita en la temática de puestas a tierra es un curso electivo del programa de Ingeniería Eléctrica, denominado "Sistemas de puesta a tierra", que se dicta desde 2002.

Copyrighted material

de puesta a tierra y en las técnicas de su medición. El análisis de fallas que permite la evaluación de la corriente a conducir por el suelo es tema del capítulo 6, y los efectos de la corriente en el cuerpo y la definición de tensiones tolerables son tratados en el capítulo 7. Los capítulos 8 y 9 se dedican al cálculo y diseño de las puestas a tierra, incluyendo también aspectos constructivos, y por último, el comportamiento transitorio de las puestas a tierra, con particular atención a su desempeño ante rayos, es lo que se aborda en el capítulo 10.

Sólo nos resta, para culminar este agradabilísimo trabajo, recibir realimentaciones de quienes en la docencia, en el aprendizaje, en la aplicación en ingeniería o en la práctica investigativa, encuentren útil el conjunto o parte del material de este texto.

Germán Moreno O.
Medellín, junio de 2007

Copyrighted material

Copyrighted material

1

Introducción: importancia y fundamentos de la ingeniería de las puestas a tierra

1.1 Importancia de las puestas a tierra y de su conocimiento

1.1.1 En las empresas de energía y otras grandes empresas

Desde varias décadas atrás y en la medida en que los sistemas de potencia eléctrica y de comunicaciones han crecido a un ritmo que es manifestación del desarrollo de los países, las puestas a tierra han ganado importancia, pese a normalmente no constituir uno de los grandes costos de los proyectos eléctricos. Esto se debe a que, como contraparte, son esenciales en lo referente a dos problemas fundamentales: la seguridad de las personas y la seguridad de los equipos. En efecto, un inadecuado diseño o construcción de una puesta a tierra puede traducirse en la aparición de sobretensiones que comprometan el aislamiento y la vida útil de los equipos o, más grave aún, en choques eléctricos que pueden causar serias heridas y aun la muerte a personal técnico que opere en los sistemas eléctricos, o inclusive a personas que en su actividad cotidiana entren en contacto con las redes eléctricas, al utilizarlas para quehaceres rutinarios, lo que en la vida moderna es simplemente inevitable.

Así, pues, es deseable que en las empresas con grandes instalaciones eléctricas y en particular en las empresas de energía, haya personal que tenga conocimiento de los fundamentos y manejo de las puestas a tierra. De hecho, las puestas a tierra están involucradas en actividades de diseño, construcción y operación del sistema eléctrico, deben ser asunto de especial atención en las relacionadas con seguridad industrial y salud ocupacional, y no pueden ser olvidadas aun en otras como la gestión tecnológica.

El diseño de puestas a tierra requiere un proceso de cálculo complejo, que sólo con el impresionante desarrollo de los sistemas de cómputo ha permitido la implementación de métodos confiables. Además, es necesario un modelamiento adecuado

Copyrighted material

del suelo, que debe considerar parámetros que no presentan un comportamiento simple y constante, en particular la resistividad eléctrica, lo que exige un conocimiento de base que permita una modelación suficientemente sencilla (simplificada) pero correcta y que represente en forma razonablemente fiel las condiciones en que se desarrolla el fenómeno de conducción de corriente por el suelo. Todo lo anterior debe ir acompañado de un criterio de seguridad confiable que, por último, deberá caracterizar la bondad del diseño acometido.

La operación de sistemas eléctricos, en particular los de grandes dimensiones, como los que debe atender una empresa de energía, es determinada, entre otros factores, por el hecho de estar o no conectados a tierra sus circuitos o serlo de una u otra manera. La capacitancia involucrada, determinada por numerosos factores ,como la longitud de los circuitos y demás características del sistema de distribución, asociada al tipo y condiciones de la puesta a tierra (efectivamente puesto a tierra a través de impedancias, sólidamente puesto a tierra, etc.), influirá de manera importante en las sobretensiones y en la probabilidad de que las fallas evolucionen hacia peores condiciones.

La construcción de las puestas a tierra requiere cuidados especiales y es determinante de su comportamiento en operación. Esa construcción compromete conocimientos sobre los materiales a utilizar, tratamiento del terreno, características de las soldaduras o de conectores certificados, etc.

La seguridad humana y la salud ocupacional son aspectos que tienen estrecha relación con las puestas a tierra y, más aún, son parte esencial de su razón de ser. En términos de las funciones que en ese campo deben realizarse desde las empresas de energía, un conocimiento razonable de los criterios de seguridad usados en el diseño de puesta a tierra, ciertas decisiones, por ejemplo, conectar a tierra o no la malla de cerramiento, de interés para el diseño de manuales de seguridad.

Siendo que las puestas a tierra son tan omnipresentes, la gestión tecnológica que una empresa de energía aplica en su manejo requiere conocimientos para liderar la selección o producción de normas, para la evaluación y selección de tecnologías de diseño y constructivas, para definir la instrumentación de medición y hasta para asesorar a la propia empresa en la contratación de expertos o para adquirir información en este tema altamente especializado.

1.1.2 En empresas e instalaciones usuarias de la red eléctrica

Las puestas a tierra se diseñan y construyen con el fin de evacuar corrientes provenientes de fallas en el sistema de potencia, descargas eléctricas atmosféricas o cargas estáticas, sin riesgo de producir daños en personas y equipos; también para servir de referencia lógica, y con ello permitir el correcto funcionamiento de equipos electrónicos altamente sensibles. Al momento de realizar los respectivos cálculos, debe considerarse la finalidad de la puesta a tierra por diseñar, el tipo de conexión a tierra que utiliza el sistema de alimentación y el tipo de instalación para la cual se planea la construcción del sistema de puesta a tierra (SPT), pues pueden presentarse diversas características según su destinación: residenciales, comerciales, industriales, hospitalarias o de telecomunicaciones.

Copyrighted material

Aunque funcionan a bajas tensiones, las instalaciones residenciales no dejan de ser riesgosas. En ellas, la puesta a tierra se utiliza principalmente como punto de referencia del cableado de neutro y de tierra del sistema, punto que, según el esquema de conexión determinado por la empresa de energía eléctrica, está ubicado en el transformador de distribución (en poste o en cuarto de subestación), en el contador de energía o en el tablero que aloja los dispositivos de desconexión (de *breakers*), o en todas las anteriores, según el caso. Adicionalmente, la puesta a tierra se hace presente, en este tipo de ambientes, para la protección de las edificaciones y sus instalaciones contra el impacto de descargas eléctricas atmosféricas directas, lo cual tiene implicaciones en el sistema de puesta a tierra general, y requiere de su propia metodología de diseño, debido a los esfuerzos que sufren los sistemas de puesta a tierra bajo la acción de los rayos.

En instalaciones comerciales los niveles de tensión suelen ser reducidos, y el uso que se le da a la energía eléctrica en ellas es básicamente para la alimentación de tomas, iluminación y aires acondicionados. También aquí la puesta a tierra debe proveer protección para las personas, una adecuada referencia de voltaje para el sistema eléctrico y la protección de la edificación contra las descargas eléctricas atmosféricas.

La industria es uno de los ambientes más exigentes, dadas las necesidades de seguridad y calidad de la potencia requeridas, y lo complejo de las instalaciones y los equipos, que frecuentemente incluyen máquinas de control numérico o con componentes electrónicos sensibles que exigen una adecuada puesta a tierra para su correcto funcionamiento. Las características de la instalación imponen, con frecuencia, cuidados especiales en las puestas a tierra, sobre las cuales aplica una amplia normatividad, que debe ser considerada para su diseño e instalación.

Las instalaciones hospitalarias requieren un cuidado especial debido a que, aunque muchas veces no manejan tensiones elevadas que puedan producir electrocución, poseen equipos de alto costo y alta sensibilidad, muy susceptibles a la interferencia de otros equipos u otros sistemas eléctricos, por lo que se pretende que la puesta a tierra mitigue tal interferencia, llevándola a niveles tolerables.

En cuanto a las telecomunicaciones, lo común es utilizar un sistema de puesta a tierra que sirva de referencia a los equipos y que, a su vez, esté en capacidad de evacuar las altas corrientes, producto de las descargas eléctricas atmosféricas.

1.2 Objetivos del sistema de puesta a tierra

Las anotaciones de la sección 1.1 ya dejan esbozados los objetivos de los sistemas de puesta a tierra. Para precisarlos, puede invocarse la norma IEEE Std 80 (2000: 8), que establece los siguientes objetivos para una puesta a tierra:

- Asegurar que una persona en la vecindad de las instalaciones de la puesta a tierra no quede expuesta al peligro de un choque eléctrico crítico.
- Proveer medios para disipar corrientes eléctricas en la tierra, bajo condiciones normales o de falla, sin exceder límites operativos del sistema o equipo, o afectar adversamente la continuidad del servicio.

Lo anterior significa que para lograr una conexión a tierra segura es necesario un gran esfuerzo para controlar la interacción entre dos sistemas de puesta a tierra:

Copyrighted material

- La conexión a tierra intencional, consistente en el uso de diferentes tipos de electrodos instalados a alguna profundidad bajo la superficie del suelo.
- La conexión a tierra accidental, establecida temporalmente por una persona expuesta a un gradiente de potencial en la vecindad de un equipo conectado a tierra.

Esta interacción se traduce en circuitos eléctricos en los que el cuerpo de la persona queda haciendo parte de los mismos (punto a ampliar en el capítulo 7, sobre seguridad humana) y sufriendo los efectos de la corriente, que pueden ir desde apenas su percepción hasta ser causa de muerte.

Hay algunos otros objetivos, comprendidos en los ya expuestos; por ejemplo, los sistemas eléctricos deben estar conectados a tierra, para (NFPA 70, 1999):

- limitar los voltajes debidos a descargas eléctricas atmosféricas;
- limitar los voltajes debidos a maniobras;
- limitar el voltaje debido a contacto no intencional con sistemas de mayor voltaje;
- estabilizar el voltaje a tierra durante la operación normal;
- facilitar la operación de dispositivos de sobrecorriente, en caso de fallas a tierra.

Algunas consideraciones al respecto de estos fines serán hechas más adelante, a propósito de sistemas conectados o no a tierra. Por otra parte, en el capítulo 7 se analizan las condiciones en que puede presentarse un choque eléctrico y el cálculo de las tensiones máximas admisibles, y en el capítulo 8, de mallas de puesta a tierra, se presenta el análisis de la disipación de corriente en la tierra.

1.3 Definición del problema

Existen diversas situaciones en que disponer de una conexión a tierra es conveniente para un sistema eléctrico, bien para su adecuado funcionamiento (por ejemplo, dar una referencia firme a todos los potenciales del sistema), bien para tener una interacción no dañina con sistemas vecinos, uno de los cuales puede ser el hombre, que se sirve del sistema o trabaja sobre él. Cuando en la tierra no hay conducción de corriente, la superficie del suelo se aproxima mucho a una equipotencial y se utiliza como referencia de voltaje, asignándole un valor nulo (cero).

La tierra es un material bastante complejo, sobre cuya constitución se tratará más adelante, del cual cabe resaltar aquí dos características contradictorias: puede considerarse un conductor eléctrico muy pobre, si se le compara con la mayoría de los metales, como lo ilustra el hecho de tener conductividades del orden de 10^{10} veces menores que el cobre, lo que le dificulta la conducción de la corriente eléctrica. Pero fácilmente se dispone de un área enorme para realizar esa conducción, lo que para numerosos efectos prácticos la acerca suficientemente a la condición de medio adecuado para transportar la corriente, por su baja resistencia (recuérdese que $R = l / \sigma A$, *resistencia* es igual a *longitud* sobre [*conductividad por área transversal*]).

De lo anterior se sigue que la corriente utilizará toda el área transversal disponible para propagarse y entonces su comportamiento no corresponde tanto a un modelo

Copyrighted material

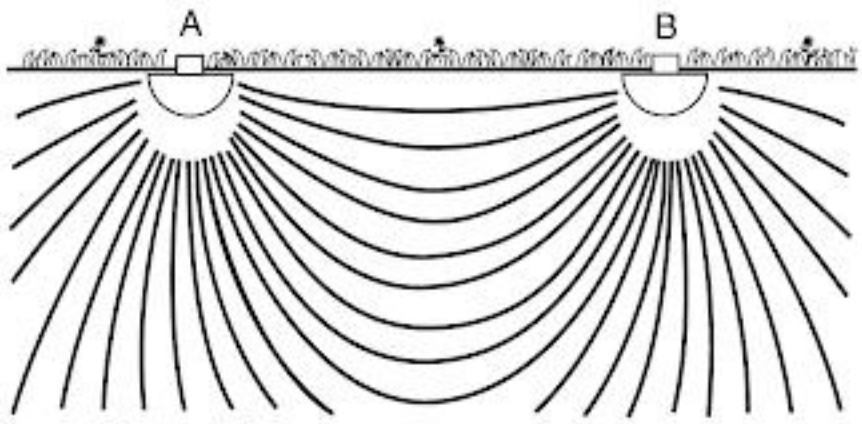

Figura 1.1 Líneas de corriente. Inyección en A y recolección en B (o viceversa) en medio homogéneo

circuital, sino a un arreglo de distribución de campos. Matemáticamente, este comportamiento se presentará en el capítulo 9. Por ahora, valga recordar que las líneas de corriente coincidirán con líneas de campo eléctrico y tendrán, transversales a ellas, líneas equipotenciales que disminuirán su valor a medida que se alejan de la fuente. Las figuras 1.1, 1.2 y 1.3 ilustran lo anotado en estos párrafos.

En la figura 1.1 se observan las líneas de corriente para una inyección de corriente desde un punto en la superficie de un suelo homogéneo, por ejemplo A, y su recolección en el otro (B). Podrían ser las líneas de campo eléctrico de dos cargas opuestas en los puntos A y B. En la figura 1.2 se muestran algunas equipotenciales debidas a la inyección de corriente en el suelo por un conductor, y se grafican sus valores, decrecientes con la distancia de la fuente. En la figura 1.3 se ilustra una puesta a tierra física simple y sus componentes.

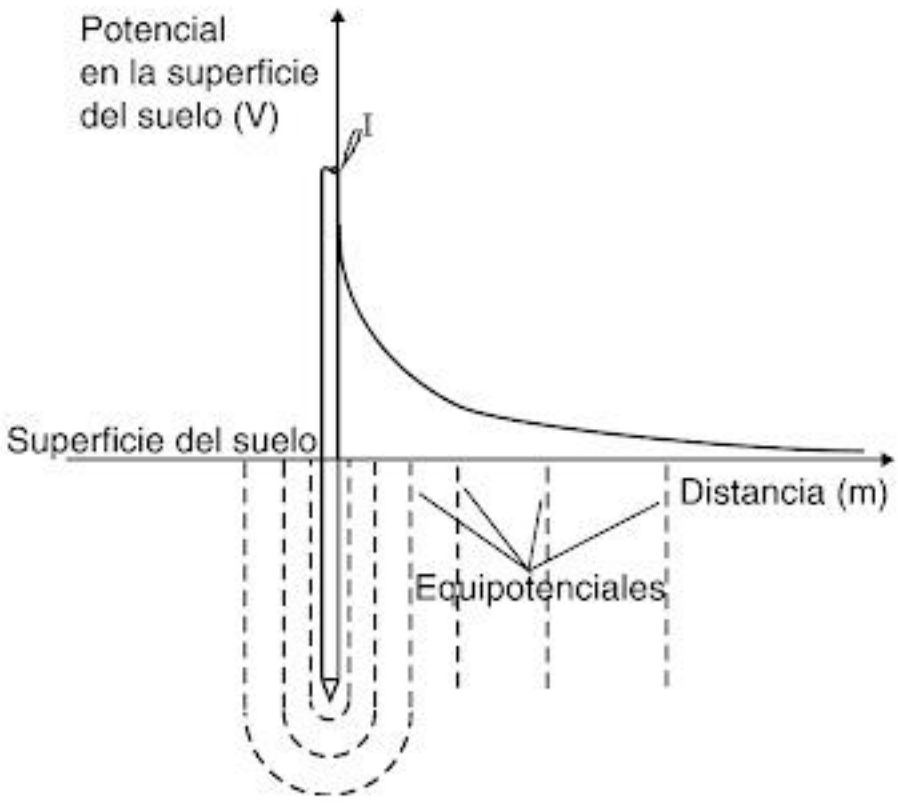

Figura 1.2 Equipotenciales y perfil de tensión por una inyección de corriente a tierra

Lo anterior hará que en la superficie del suelo ahora aparezcan diferencias de potencial entre puntos no localizados sobre la misma equipotencial, lo que denominamos *gradientes de potencial*. Si esos gradientes son suficientemente altos, las personas podrían entrar en contacto con puntos entre los cuales hay un voltaje que las sometería a un choque eléctrico capaz de producirles daños severos, inclusive la muerte. Y en los equipos, igualmente pueden aparecer sobretensiones que dañen componentes importantes o el equipo en su totalidad. Esto plantea entonces el problema de manejar sistemas de puesta a tierra. Se trata de concebirlos, diseñarlos, construirlos y operarlos, en forma tal que den seguridad al sistema eléctrico y a quienes trabajan en él, y no generen daños a otros sistemas (en particular a personas que se encuentren en sus vecindades) con los que puedan interactuar.

Copyrighted material

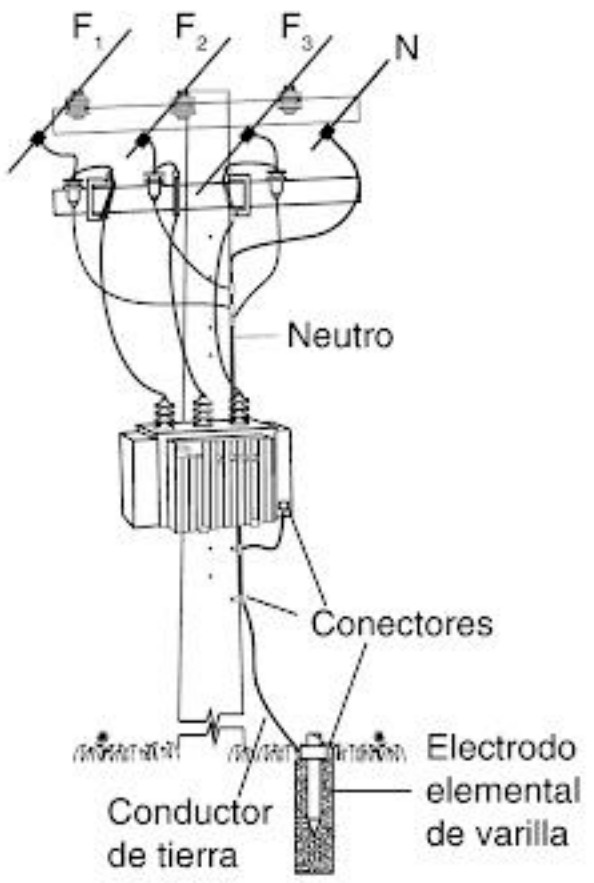

Figura 1.3 Componentes de una puesta a tierra elemental. F_1, F_2 y F_3 son fases; N es el neutro.

1.4 Puesta a tierra de los sistemas de potencia

En un sistema eléctrico de transporte de energía, la decisión sobre la conexión o no del neutro a tierra, y la forma de realizarlo, implica un compromiso entre sobretensiones y sobrecorrientes. Considerando ambos extremos, se producen mayores sobretensiones en un sistema aislado de tierra y mayores sobrecorrientes en un sistema sólidamente puesto a tierra (impedancia de conexión nula).

Lo anterior exige numerosas consideraciones, principalmente relacionadas con el comportamiento de una de las fases durante las fallas a tierra, frecuentemente resultante de un rayo sobre la red aérea. En todo caso, es prioritario que el método seleccionado garantice una rápida extinción del arco resultante de una falla a tierra, evitando al máximo una interrupción del servicio (Razevig, 1985).

De manera muy simplificada, la figura 1.4 ilustra el circuito que se forma en un sistema de transporte cuando se presenta la falla a tierra de una de las fases.

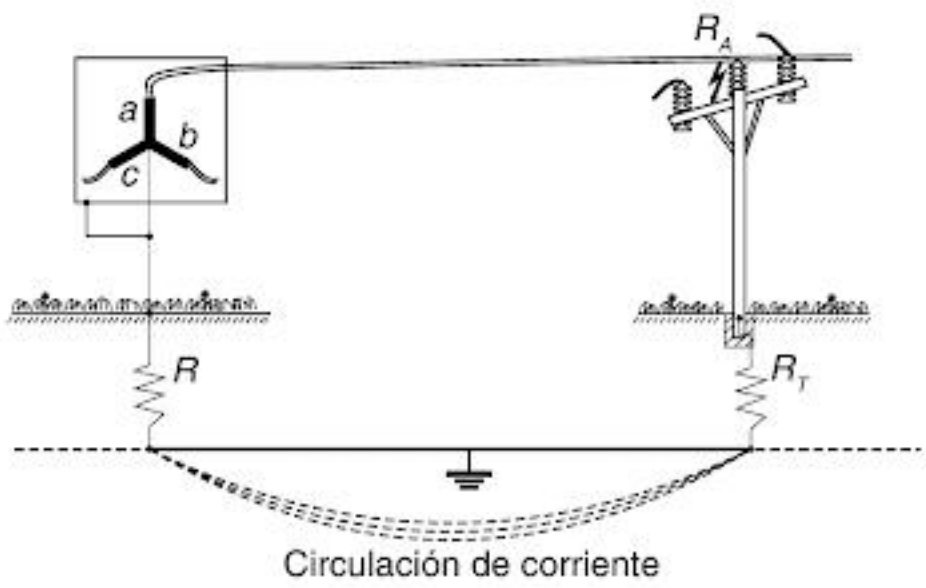

Figura 1.4 Circuito de corriente de falla fase-tierra. *a*, *b* y *c:* fases; *R*, R_T: resistencias de puesta a tierra; R_A: resistencia de falla.

En el caso de no existir neutro conectado a tierra, al presentarse falla a tierra circula una corriente capacitiva, cuyo valor es proporcional a la capacitancia a tierra total del circuito; cuando ésta es baja, la corriente en una falla simple a tierra es de sólo unos pocos amperios y la presencia del corto no afecta el servicio, permitiendo mantenerlo mientras se resuelve la situación, lo que, además, se ve favorecido porque el arco que se haya podido producir es inestable a esta baja corriente y se extingue rápidamente. Al aumentar la capacidad del sistema, la situación cambia, pues la corriente de corto aumenta, el arco no se extingue fácilmente y, por la acción del viento y la transferencia de calor, puede ampliar su campo de acción y provocar fallas adicionales en una o más fases, obligando a la in-

Copyrighted material

terrupción del servicio. Por supuesto, bajo esas condiciones, la opción de no conectar a tierra el sistema pierde justificación.

La figura 1.5 muestra un circuito bastante general (donde aparecen las diferentes componentes, resistiva, inductiva y capacitiva, de cualquier sistema) e ilustra la condición por analizar para seleccionar adecuadamente el método de conexión a tierra en sistemas eléctricos de potencia.

Por lo común, las consideraciones básicas para la selección del esquema de conexión a tierra son las siguientes (ANSI/IEEE C62.92, 1987; IEEE C62.92.4, 1991):

- Sensibilidad y selectividad de relés de tierra.
- Limitación de la corriente de falla a tierra.
- Grado requerido de protección contra sobretensiones (supresores).
- Limitación de las sobretensiones transitorias fase-tierra.
- Seguridad.

Para apoyar la determinación del método de conexión a tierra, se han establecido parámetros, como el coeficiente de conexión a tierra y el factor de falla a tierra, que a su vez pueden caracterizar un sistema como: sólidamente, efectivamente o no efectivamente puesto a tierra, o con neutro sin referenciar a tierra (neutro aislado) y la conexión a tierra puede hacerse por diversos medios. Opciones utilizadas con frecuencia para evitar la transformación de una falla fase-tierra en una que involucre más fases, son la de sólidamente y la de efectivamente puesto a tierra.

Sólidamente puesto a tierra es conectar directamente el neutro a través de una conexión adecuada a tierra, en la cual no se ha insertado de manera intencional una impedancia.

Efectivamente puesto a tierra es conectar el neutro a través de una impedancia

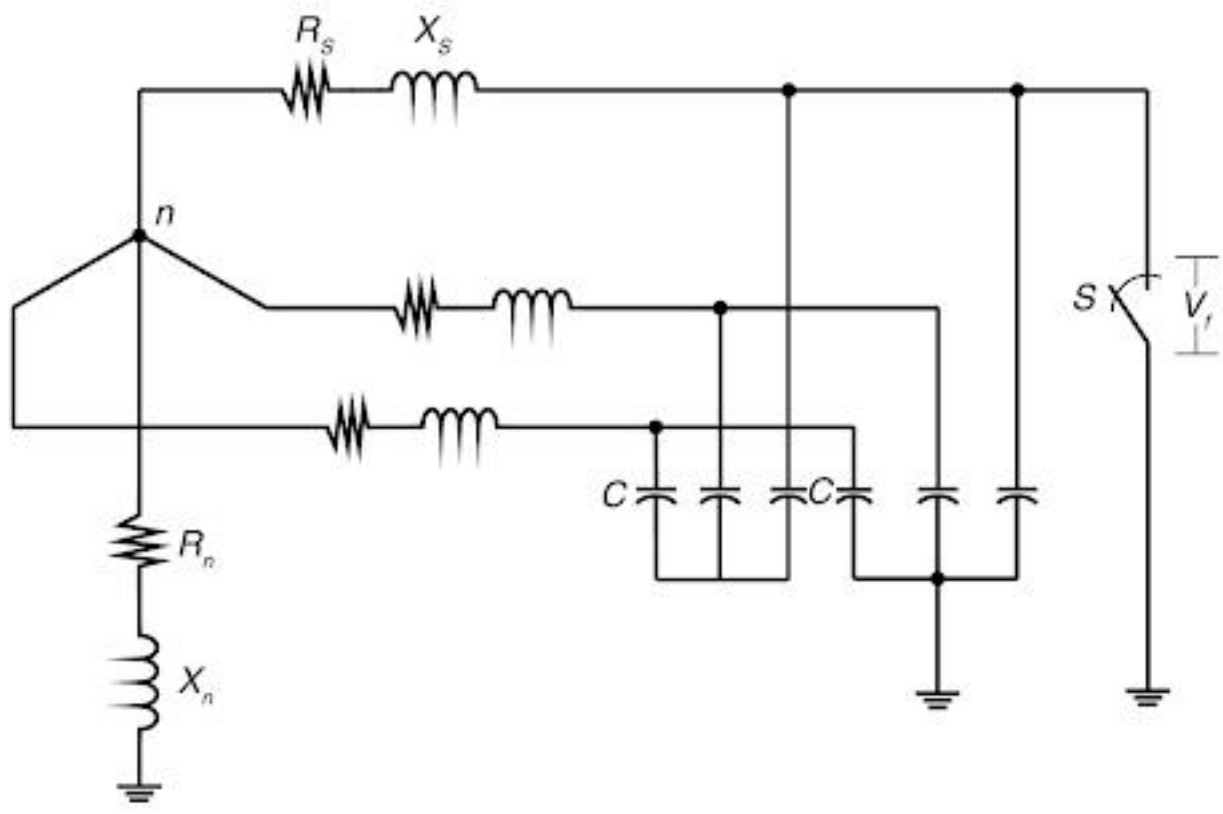

Figura 1.5 Circuito para análisis de la puesta a tierra de sistemas de potencia. R_S, X_S: resistencia y reactancia de cada fase; R_N, X_N: resistencia y reactancia neutro-tierra en la fuente; C: capacitancia entre fases o fase-tierra; V_f: tensión en el punto de falla.

Copyrighted material

lo suficientemente baja como para que el coeficiente de conexión a tierra (véase el glosario) no exceda el 80%. Se busca con esto una corriente de cortocircuito inductiva y de suficiente magnitud para hacer entrar en acción rápidamente los relés de protección, con lo cual se evita la propagación de la falla a otras fases y el daño de aisladores, pudiendo la línea ser puesta en operación casi de forma inmediata.

Las consideraciones expuestas aquí sobre la conexión a tierra de sistemas son válidas principalmente para sistemas de transmisión o de distribución. Para instalaciones industriales y comerciales, puede presentarse diversidad de criterios y otras referencias pueden servir de apoyo (ANSI/IEEE Std 142, 1993, por ejemplo). Cabe anotar que un sistema completo de conexiones a masa puede estar flotante con respecto a la tierra y ser independiente de ella (aviones, helicópteros, naves de diversos tipos, etc). Estas instalaciones requieren consideraciones y normas particulares que no son objeto de este libro.

1.5 Esquemas de conexión a tierra*

Según el tipo de instalación eléctrica que se requiera, existen diferentes modalidades de conexión a tierra o también llamados *regímenes de neutro*, apropiados según sea la prioridad para el usuario. Por ejemplo, mantener la disponibilidad de energía eléctrica sin importar el costo, tal como sucede en los hospitales o en industrias, donde el costo de un cese de producción es demasiado alto.

La conexión del cable de neutro a tierra permite la activación de los dispositivos de protección contra sobrecorrientes (DPCC), y le proporciona a la corriente un camino de baja impedancia, a través del cual puede regresar a la fuente. Esto implica una circulación de corriente de magnitud considerable (corriente de falla I_d) y, por tanto, la desconexión de la(s) línea(s) fallada(s) una vez los elementos de protección se activan.

En baja tensión, la forma de conectar a tierra el secundario del transformador origina dos formas de conexión: una con neutro puesto a tierra (T) y otra con neutro aislado (I). Además, la conexión del cable de neutro a tierra tiene dos variantes:

1. Las partes metálicas de las cargas (carcasas) se conectan a neutro, comúnmente denominada TN (donde la primera letra indica la forma de conexión del neutro del transformador, y la segunda, la forma de conexión de las carcasas). Esta conexión, a su vez, se subdivide en tres tipos más, los cuales son:
   - Un solo cable con función de neutro y de tierra de protección (TN-C) (véase la figura 1.6*a*, donde U_d es la tensión debida a la corriente de falla y R_d es la resistencia de cortocircuito).
   - El conductor de tierra (CP) es independiente del conductor de neutro (TN-S) (véase figura 1.6*b*).
   - Combinación de las dos anteriores (TN-C-S) (véase figura 1.6*c*).
2. Además de la conexión a tierra del neutro (R_B), las partes metálicas de las

* Los temas tratados en esta sección son tomados de Lacroix (2000).

Copyrighted material

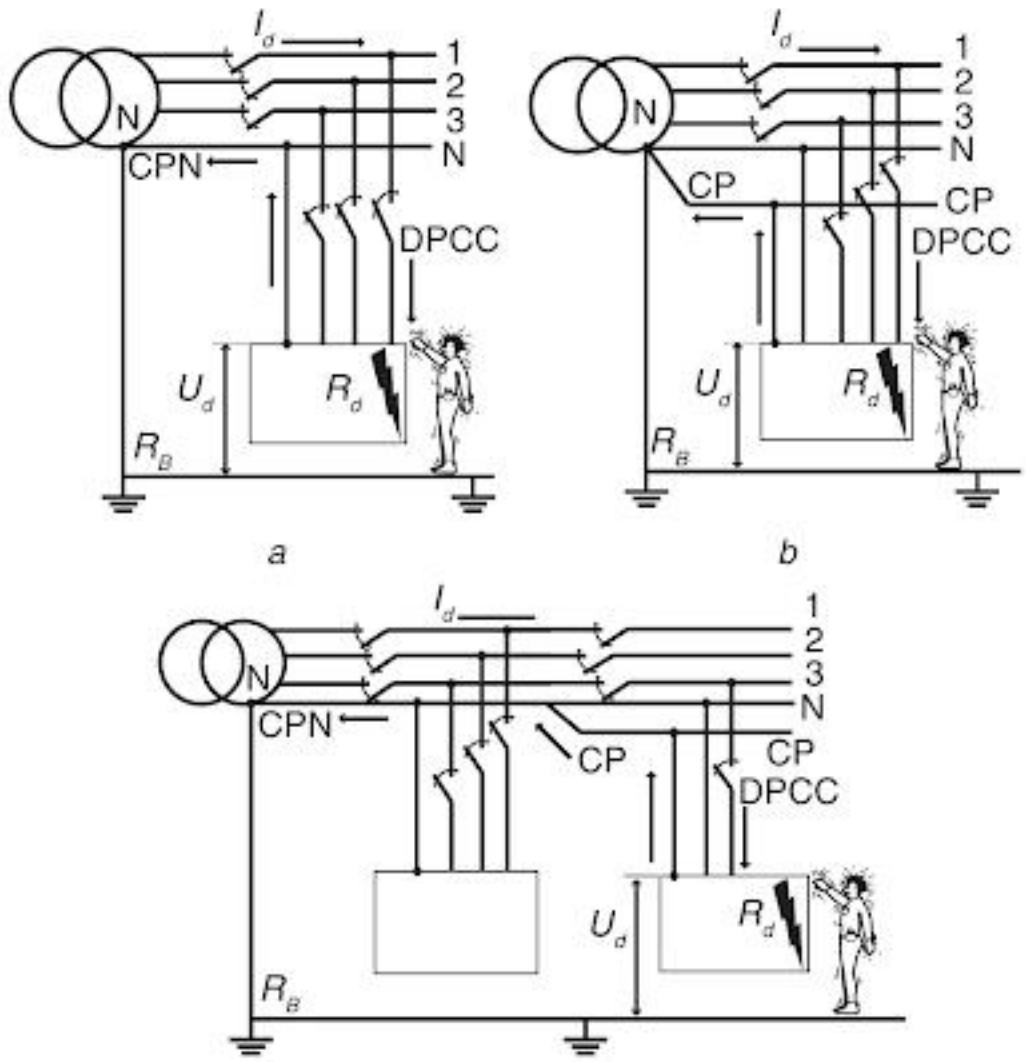

Figura 1.6 Diferentes esquemas de conexión a tierra de equipos. *a)* TN-C; *b)* TN-S; *c)* TN-C-S.

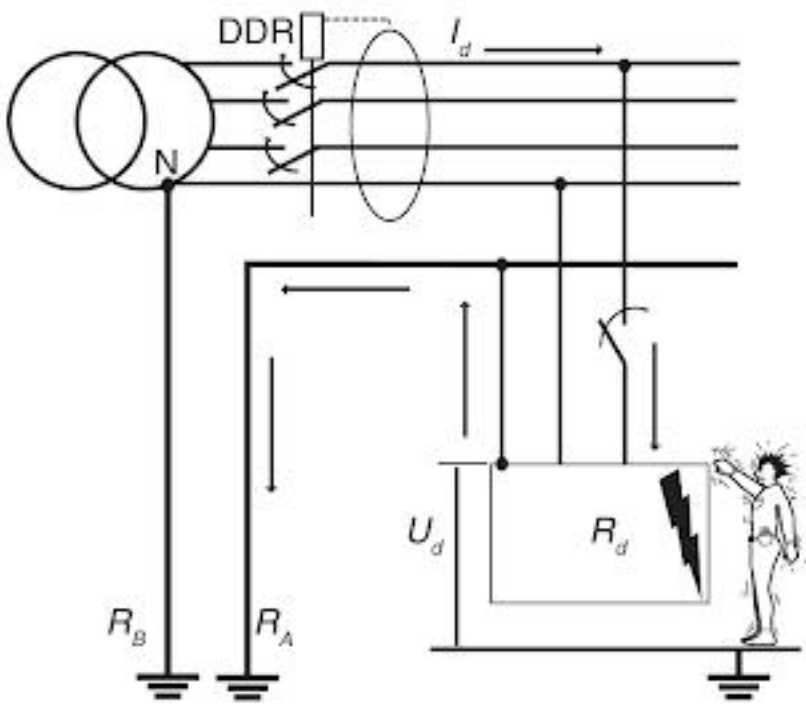

Figura 1.7 Diferentes esquemas de conexión a tierra de equipos. Conexión TT

cargas (carcasas) son conectadas también a tierra (R_A), es decir, conexión TT (véase figura 1.7), lo cual no implica necesariamente que tanto la tierra del neutro como la de las partes metálicas queden equipotencializadas; por ello se debe colocar un detector de falla a tierra (DDR).

En Colombia, por el tipo de instalaciones eléctricas que se realizan, las más utilizadas son la TN-S y la TN-C-S. En el segundo régimen de conexión siempre se busca que la TN-S nunca esté aguas arriba de la conexión TN-C y se procura, además, la equipotencialización entre las diferentes puestas a tierra de la instalación.

En algunas ocasiones resulta conveniente aislar el neutro de tierra (conexión IT) como se puede ver en la figura 1.8, lo cual, como se mencionó anteriormente, es utilizado en edificaciones en donde hay una alta necesidad de continuidad en el servicio de energía. Este tipo de conexión tiene la particularidad de no desconectar la fase fallada, mientras no se presente una segunda falla en otra de las fases; aunque tiene la desventaja de generar grandes sobretensiones, que pueden causar incompatibilidad electromagnética con equipos cercanos a la red o alimentados por ésta, y que exigen un aislamiento de cableado de mayores dimensiones a los utilizados en las conexiones TN o TT. Esto implica, a su vez, un incremento en los costos de la instalación, tanto por esto como por la inversión que se requiere en los detectores de falla a tierra, dado

Copyrighted material

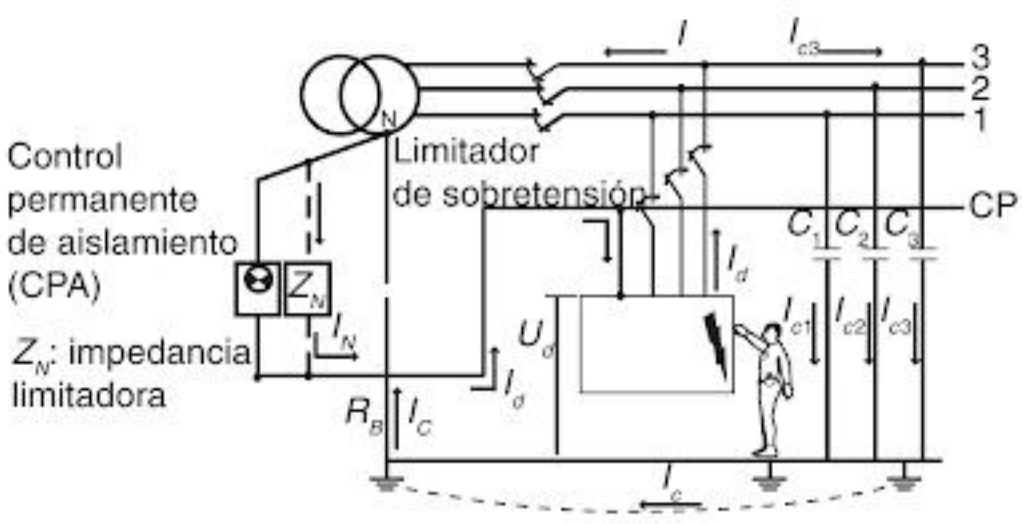

Figura 1.8 Diferentes esquemas de conexión a tierra de equipos. Conexión IT

que la falla monofásica no desconecta la alimentación de la(s) carga(s).

1.6 Normatividad actual en Colombia

En Colombia, fruto de la globalización y bajo exigencia de la Organización Mundial del Comercio, perdieron vigencia las normas técnicas obligatorias y pasaron a ser de carácter voluntario (lo que permite, por ejemplo, que una empresa, por voluntad propia, imponga explícitamente a sus proveedores o contratistas el cumplimiento de determinadas normas), dando paso a un nuevo esquema de reglamentos técnicos obligatorios.

Para proteger la seguridad de las personas, la vida animal y vegetal, y el medio ambiente ante las instalaciones eléctricas, se expidió, por medio de la Resolución 18 0398 de 2004, del Ministerio de Minas y Energía, el *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas* (Retie), en el cual se establecen las medidas para prevenir, minimizar o eliminar los riesgos de origen eléctrico (Ministerio de Minas y Energía, 2004).

Luego de la aprobación del Retie, su publicación en el *Diario oficial* el 27 de junio de 2004, y su entrada en vigencia el 30 de abril de 2005, es de gran importancia para las empresas del sector eléctrico y su personal electricista, prepararse para la adecuada implementación de las directrices dadas en este reglamento, en particular en cuanto a los sistemas de puesta a tierra y de protección contra rayos.

En este reglamento, los sistemas de puesta a tierra desempeñan un papel fundamental, y es por ello que en el capítulo II, denominado "Requisitos técnicos esenciales", en su artículo 15, se refiere a las puestas a tierra, como uno de los componentes esenciales en los aspectos de seguridad, mientras lo referente a protección contra rayos se trata en el capítulo VII, artículo 42.

Este nuevo reglamento aplica para todas las instalaciones eléctricas, desde generación, transformación, transmisión y distribución, hasta el usuario final, y para todos los procesos, pasando por diseño, dirección, construcción, supervisión, mantenimiento e inspección de las instalaciones.

Entre otros aspectos, se introduce la figura de la Inspectoría de Instalaciones Eléctricas, para la cual los ingenieros y técnicos electricistas y electromecánicos deben prepararse y tener la competencia para adelantar las respectivas inspecciones.

Un aspecto de particular importancia del Retie es que presiona para que las puestas a tierra y la protección contra rayos, que venían siendo manejadas con mucho empirismo, con poca aplicación de normatividad y sin mayor preocupación por profundizar en su conocimiento, deban ser ahora diseñadas e instaladas cumpliendo con los artículos 15 y 42 del Retie, con el capítulo II de la norma técnica colombiana

Copyrighted material

NTC 2050 de 1998, que en su artículo 250 se refiere a los requisitos de conexión a tierra en instalaciones internas, y cumpliendo también con condiciones de seguridad según normas internacionales, como IEC y ANSI/IEEE, en cuanto al control de tensiones de contacto, de paso y transferidas, en los sistemas de puestas a tierra.

1.7 Puesta a tierra en sistemas DC

Apenas con el ánimo de dar una mirada integral, se presentan a continuación algunas consideraciones que acompañan el uso de las puestas a tierra en sistemas DC.

En los sistemas de transmisión monopolar HVDC, predominantemente sistemas de transmisión por cable, los electrodos de tierra son componentes del sistema, puesto que por éstos se lleva la corriente de operación en forma continua. Ellos contribuyen decisivamente a bajar los costos de los sistemas HVDC de baja potencia, ya que los costos del segundo conductor son significantemente más altos, aun para transmisión en distancias cortas, que los de electrodos de tierra.

Como en cualquier sistema de alta tensión, los circuitos de potencia de los sistemas de HVDC requieren un punto de referencia para la definición del voltaje del sistema, como base para la coordinación de aislamientos y la protección ante sobretensiones. En los sistemas bipolares de HVDC, en principio es posible la conexión del punto neutro a la malla a tierra, en la subestación donde se conecta el neutro de la estrella del lado de la línea de los transformadores del convertidor. Pero dado que las corrientes directas en los dos polos de HVDC no son absolutamente iguales, una corriente fluye continuamente del punto neutro de la estación a la tierra. Esto es peligroso, por causar corrosión no sólo en la malla a tierra, sino también en todas las otras estructuras metálicas enterradas, como cables, tuberías, etc.

Los criterios de evaluación para los electrodos de tierra en sistemas de HVDC tienen que ver con:

- *Capacidad de transporte de corriente:* en los sistemas monopolares, los electrodos de tierra deben llevar la corriente nominal del sistema, incluyendo alguna sobrecarga durante un período largo; en sistemas bipolares, adicionalmente deben preverse maniobras que pueden causar que el doble de la corriente nominal deba ser manejada. También es esencial determinar si dos ciclos de sobrecarga pueden ocurrir, uno inmediatamente después del otro. La definición de las magnitudes de corrientes a tierra y la duración de éstas es especialmente importante en los electrodos de tierra, porque la constante de tiempo térmica de la tierra se asume que es de varios meses. La temperatura máxima de la tierra alcanzada durante el funcionamiento no debe exceder 85° C, para prevenir el resecamiento térmico en las áreas adyacentes al electrodo.
- *Densidad de corriente:* se define como la relación entre el flujo de corriente en la interfaz del electrodo de tierra con el medio que lo rodea, y la superficie del contorno externo del electrodo. Para prevenir el exceso de presión en la tierra que lo rodea, en particular el secado causado por electro-osmosis, un valor de $1 A/m^2$ no debe ser excedido. Si se excede este valor por períodos largos, hay peligro de secar irreversiblemente la tierra circundante, pasando la tierra con conductividad inicialmente buena a ser convertida en cerámica aislante.

Copyrighted material

- *Resistencia a tierra:* dependiendo de la capacidad de transporte de corriente, las resistencias del electrodo de tierra recomendadas están entre 50 y 200 mΩ.
- *Tensión del electrodo:* se recomienda que los valores estén entre 100 y 200 V.
- *Tensión de paso:* debe ser menor de 5 o, como límite máximo, 10 V/m.
- *Tensión de contacto:* debe ser de no más de unos 20 V.
- *Riesgo de corrosión:* debe evaluarse el fenómeno de corrosión electroquímica, resultante del flujo de corriente por iones en un medio electrolítico alrededor de los electrodos. Como valores de referencia se manejan 0,2 $\mu A/cm^2$ de área superficial, para el plomo, y 0,5 $\mu A/cm^2$ para el acero.
- *Efectos en sistemas AC:* cuando éstos están conectados a tierra en más de un punto, por causa de corrientes DC quedan conectados a diferencias de potencial que provocan la circulación de corriente DC en el sistema, con las consecuencias más notorias en los transformadores, como elevación del ruido y magnetización asimétrica, o incluso falso disparo de protecciones, por señales erradas de los transformadores de potencial.
- *Efectos en sistemas de telecomunicaciones:* se presentan principalmente en sistemas tradicionales telefónicos y telegráficos que funcionan también con DC.

1.8 Conclusión

De la manera como se conecte a tierra el sistema de alimentación, dependerá la forma como debe ser conectada y protegida la carga y, a su vez, las características de la puesta a tierra por utilizar. Los objetivos de la puesta a tierra serán, en todo caso, los de proteger a las personas y a los equipos, en los términos expuestos en 1.2. En cualquier condición, el cálculo y el análisis del comportamiento de la puesta a tierra deben demostrar que esos objetivos se cumplen; ello requiere de una fundamentación suficiente para que los responsables del diseño, construcción y operación de las puestas a tierra, tanto los de las empresas de energía como los de las usuarias de la misma, puedan enfrentar sin mayores temores los problemas propios de esas funciones. Este libro se propone proveer esa fundamentación.

1.9 Referencias bibliográficas

ANSI/IEEE C62.92, 1987, *IEEE Guide for the Applications of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems.* Part 1 – Introduction, Nueva York, The IEEE Inc., octubre.

ANSI/IEEE Std 142, 1993, *IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power System*, Nueva York, The IEEE Inc., mayo.

IEEE C62.92.4, 1991, *IEEE Guide for the Applications of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems*, Part 4 – Distribution, Nueva York, The IEEE Inc., diciembre.

IEEE Std 80, 2000, *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, Nueva York, The IEEE Inc., enero.

Lacroix, 2000, " Esquemas de conexión a tierra en baja tensión", *Cuaderno técnico núm. 172*, Schneider, Barcelona, Schneider Electric.

Ministerio de Minas y Energía, Colombia, 2004, "Resolución número 180398 del 3 de abril de 2004. Por la cual se expide el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - Retie". Ministerio de Minas y Energía, Bogotá.

NFPA 70, 1999, *National Electrical Code*, Massachusetts.

Razevig, D. V., 1985, *High Voltage Engineering*, Delhi, Khanna Publishers.

Copyrighted material

2

Parámetros eléctricos del suelo

El suelo es un material bastante heterogéneo y por eso su caracterización no es sencilla. Como una primera aproximación, se ha utilizado la medición de sus parámetros eléctricos a muestras de terreno en condiciones relativamente controladas en laboratorio (por ejemplo, de geometrías sencillas y humedad y compactación razonablemente homogéneas). Aun así, los valores obtenidos son de tipo "macro" (promedio para la muestra), y aunque en algunos casos permiten por lo menos un conocimiento semicuantitativo (órdenes de magnitud y tendencias de variación, por ejemplo), en general para la información necesaria en el manejo de las puesta a tierra se prefieren mediciones de campo, por la dificultad de reproducir en el laboratorio las condiciones realmente existentes en el sitio de instalación. Sin embargo, no para todos los parámetros se dispone de métodos e instrumentación adecuados. Afortunadamente, como se desarrollará más adelante, se cuenta con ellos para la medición de la resistividad, sin duda el parámetro más determinante del comportamiento de las puestas a tierra.

Los principales parámetros del comportamiento eléctrico del suelo son:

- la resistividad (ρ [Ωm]), o su inverso, la conductividad (σ [S/m]);
- la permitividad o constante dieléctrica (ε [F/m]), expresada frecuentemente por su valor relativo a la del vacío ($\varepsilon_r = \varepsilon / \varepsilon_o$; $\varepsilon_o \approx 8{,}85 \times 10^{-9}$ [F/m]);
- la permeabilidad magnética (μ [H/m]), expresada frecuentemente por su valor relativo a la del vacío ($\mu_r = \mu / \mu_o$; $\mu_o \approx 0{,}4\ \pi \times 10^{-6}$ [H/m]).

Estos parámetros no son constantes ni en el espacio ni en el tiempo o la frecuencia. Sus variaciones dependen principalmente de:

- ρ, frecuencia, humedad del suelo, substancias disueltas (principalmente las sales) y temperatura;
- ε_r, frecuencia, humedad del suelo;
- μ_r, aproximadamente constante ($\approx$1).

La variación con la frecuencia no puede perderse de vista al pasar del análisis de fenómenos a frecuencia industrial (y a la cual se realizan las mediciones de campo), como las fallas fase-tierra, a fenómenos rápidos como las descargas atmosféricas, que involucran frecuencias hasta del orden de los MHz.

Copyrighted material

La modelación del suelo para el análisis de su comportamiento como parte del sistema eléctrico es fundamental dentro de un estudio. El éxito del mismo queda condicionado por la corrección (aun dentro de inevitables aproximaciones) del modelo, esto es, su capacidad para contener lo más significativo del proceso físico que se realiza. Una práctica muy usual es la de suponer terreno homogéneo, para facilitar el uso de expresiones analíticas conocidas, por ejemplo, para la evaluación de la resistencia a tierra de electrodos, e ignorar la variación con la frecuencia. La primera de estas aproximaciones ya no corresponde con el estado del arte (hoy se prefiere un modelo de suelo de dos capas horizontales de resistividad homogénea) y la segunda conduce a errores importantes en el análisis de respuesta ante impulsos, como las descargas atmosféricas, o señales de más de algunos kHz.

La permitividad caracteriza el efecto de los dipolos atómicos y moleculares en los materiales. Adquiere relevancia cuando se estudian fenómenos transitorios o suelos de muy alta resistividad, que presentan comportamientos capacitivos notorios, determinados por la permitividad. En baja frecuencia, el último caso conduce a errores del orden del 10%, cuando no se considera el efecto capacitivo, como lo ilustra la figura 2.1, en que se comparan los valores de impedancia con los de resistencia, en diferentes resistividades. El cálculo de impedancia se obtuvo con el programa GTIERRAS (Gómez y Velilla, 2002), y se considera el efecto de la permitividad, y el cálculo de resistencias fue hecho con el programa Matier que no considera tal efecto. En el caso de transitorios rápidos, las variaciones de la permitividad con la frecuencia (Villa y Moreno, 2005) influencian notoriamente la propagación de la corriente en la tierra y, para su análisis, deben precisarse las frecuencias dominantes, según el tipo de onda de que se trate. Más adelante (en la figura 2.2) se ilustra esa variación para diferentes condiciones de humedad.

2.1 Resistividad del suelo

Estrictamente se define como la resistencia que hay entre las caras de un cubo, que tiene de lado 1 m, el cual es llenado con el suelo que se desea analizar; sus unidades son ohmio metro [Ωm]. Entonces se tiene que:

$$R = \rho\frac{L}{A} \quad \text{o} \quad \rho = R\frac{A}{L}, \tag{2.1}$$

donde R es la resistencia medida entre las cara del cubo, L es la longitud de la muestra (del cubo), A es el área transversal del cubo (o L^2) y ρ es la resistividad de la muestra de suelo, supuesto homogéneo.

La resistividad (ρ) del suelo varía dependiendo de su composición y de algunas condiciones físicas. Sus valores se encuentran desde unos pocos hasta millones de ohmios metro. Los suelos orgánicos suelen tener bajos valores; y las rocas, muy altos.

Aunque la resistividad del suelo es afectada por numerosos factores (Casas, 2005: 78), los que principalmente la determinan son (Tagg, 1964: 4):

- tipo de suelo;
- composición química de las sales disueltas en el agua contenida;
- contenido de humedad;

Copyrighted material

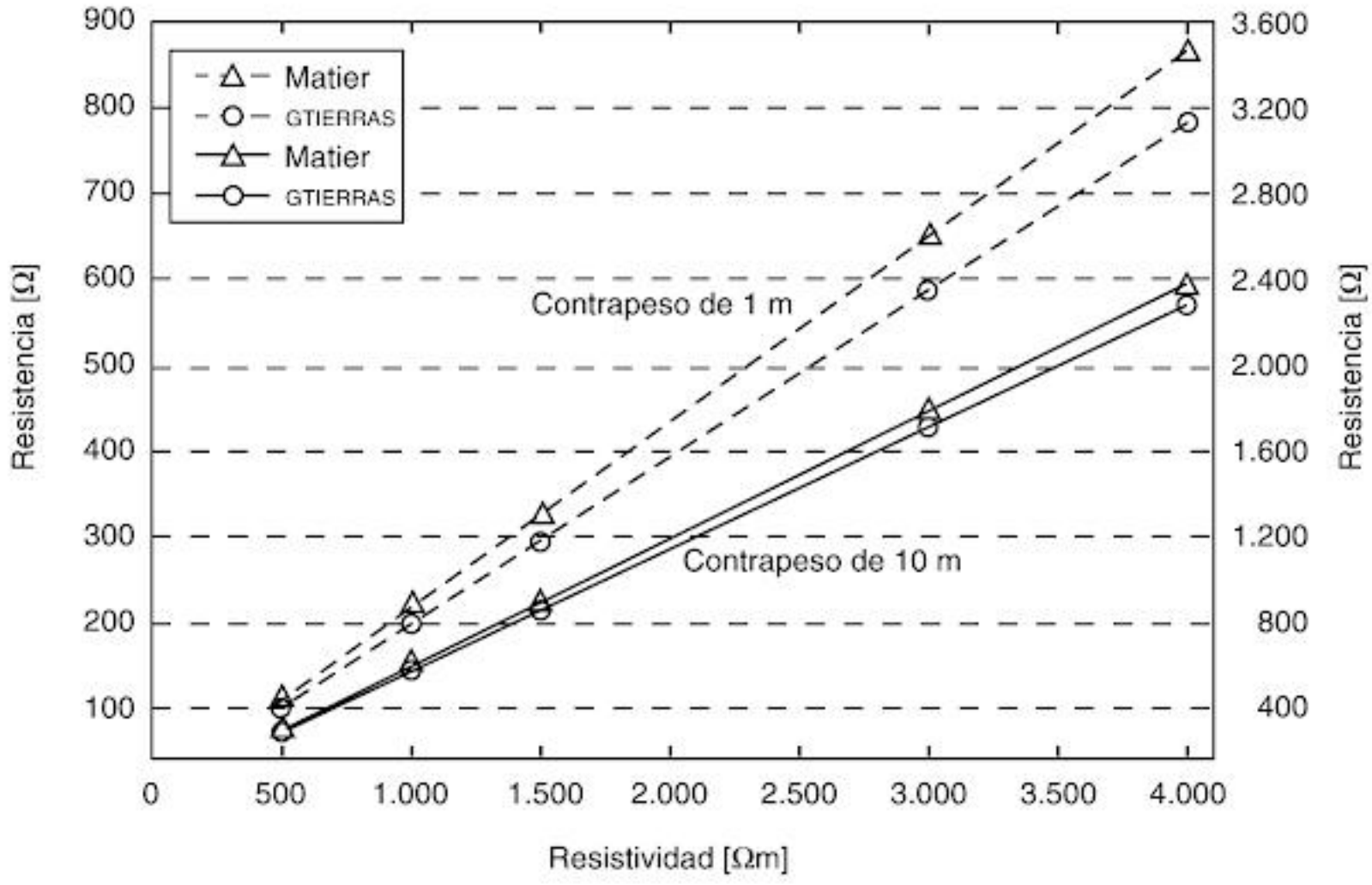

Figura 2.1 Comparación de la resistencia e impedancia de un contrapeso. Curvas de línea discontinua, escala derecha; curvas de línea continúa, escala izquierda.

- compactación;
- tamaño y distribución del grano;
- temperatura.

Se presentan a continuación algunas consideraciones sobre cada uno de estos factores.

2.1.1 Tipo de suelo

No hay una definición clara de los diferentes tipos de suelo; por ello no es posible dar valores específicos de resistividades por tipo de suelo. Se han caracterizado franjas de valores característicos para diferentes tipos de suelo en condiciones de humedad normal o natural y a baja frecuencia. La tabla 2.1 ilustra esas variaciones.

La amplia variación de la resistividad ha hecho que se intenten clasificaciones que faciliten tener una primera idea de la "calidad" del terreno. Una que se considera práctica para una primera idea gruesa de las resistividades involucradas es (ACIEM, 1998):

- *Clase A (arcilloso):* suelo blando ácido; de baja resistividad (50 a 200 Ωm), presenta una acción corrosiva alta.
- *Clase B (arenoso):* suelo seco, fácil de trabajar, mediana resistividad, entre 500 y 1.000 Ωm.

Copyrighted material

Tabla 2.1. Algunos rangos de valores de resistividad típicos

Material	*Resistividad (Ωm)*
Agua salada	0,01-1
Lama	5-10
Suelo orgánico	5-200
Humus	10-150
Arcilla	10-300
Agua de río	10-300
Gneises descompuestos	50-500
Rocas calcáreas	100-2.000
Tierra de jardín	140-480
Rocas cristalinas	20.000-1.000.000
Caliza fisurada	500-1.000
Caliza compacta	1.000-5.000
Granitos y basaltos	1.000-50.000
Arena común	3.000-8.000

Fuente: adaptada de Visacro (2002: 27) y Tagg (1964).

• *Clase C (rocoso):* suelo de rocas duras, alta resistividad, normalmente entre 1.000 y 10.000 Ωm.

2.1.2 La humedad y salinidad del suelo

La resistividad es inversamente proporcional a la humedad del terreno, debido a que la conducción de la corriente en el suelo es esencialmente electrolítica. Esto se evidencia por la drástica elevación de la resistividad cuando la humedad disminuye mucho, mostrando que la conducción se realiza a través del agua contenida; en los intersticios de las partículas del suelo deben existir dos sustancias para que se establezca el electrolito, como la sal y el agua.

La resistividad del agua está gobernada por las sales disueltas en ella; por ende, la resistividad del suelo es influenciada por la cantidad y tipos de sales disueltos en el suelo, condición en la cual se presenta la conducción electrolítica. La cantidad de agua varía de acuerdo con el clima y la época del año, la temperatura y la existencia de depósitos subterráneos. De los datos de un trabajo realizado en la Universidad de Antioquia (Henao y Ramírez, 1990), se presenta la figura 2.2, como ilustración del efecto de la humedad a diversas frecuencias.

Las variaciones por humedad, contenido de sales y temperatura se ilustran en la figura 2.3.

Por supuesto, las variaciones mostradas plantean problemas en el manejo de la resistividad en cálculos de las puestas a tierra, ya que sus factores pueden ser afectados por condiciones ambientales, algunas de ellas marcadamente estacionales. Sin embargo, las condiciones climáticas afectan esencialmente las capas más exteriores del suelo, la llamada *capa vegetal*. Por otra parte, se presenta una variación de la resistividad con la profundidad, que puede ser mayor o menor dependiendo de la estructura geológica de la región. Ahora bien, para efectos de los sistemas de puesta a tierra, interesan profundidades desde unos pocos hasta algunas centenas de metros, dependiendo de las longitudes de los electrodos (conductores) que la configuran. Esto es determinante en la aplicación de los métodos de medición de la resistividad y en los modelos de suelo utilizados para el estudio del comportamiento de las puestas a tierra, modelos que deben ser capaces de considerar la resistividad encontrada hasta la profundidad de interés para el sistema de puesta a tierra (SPT), específico.

Copyrighted material

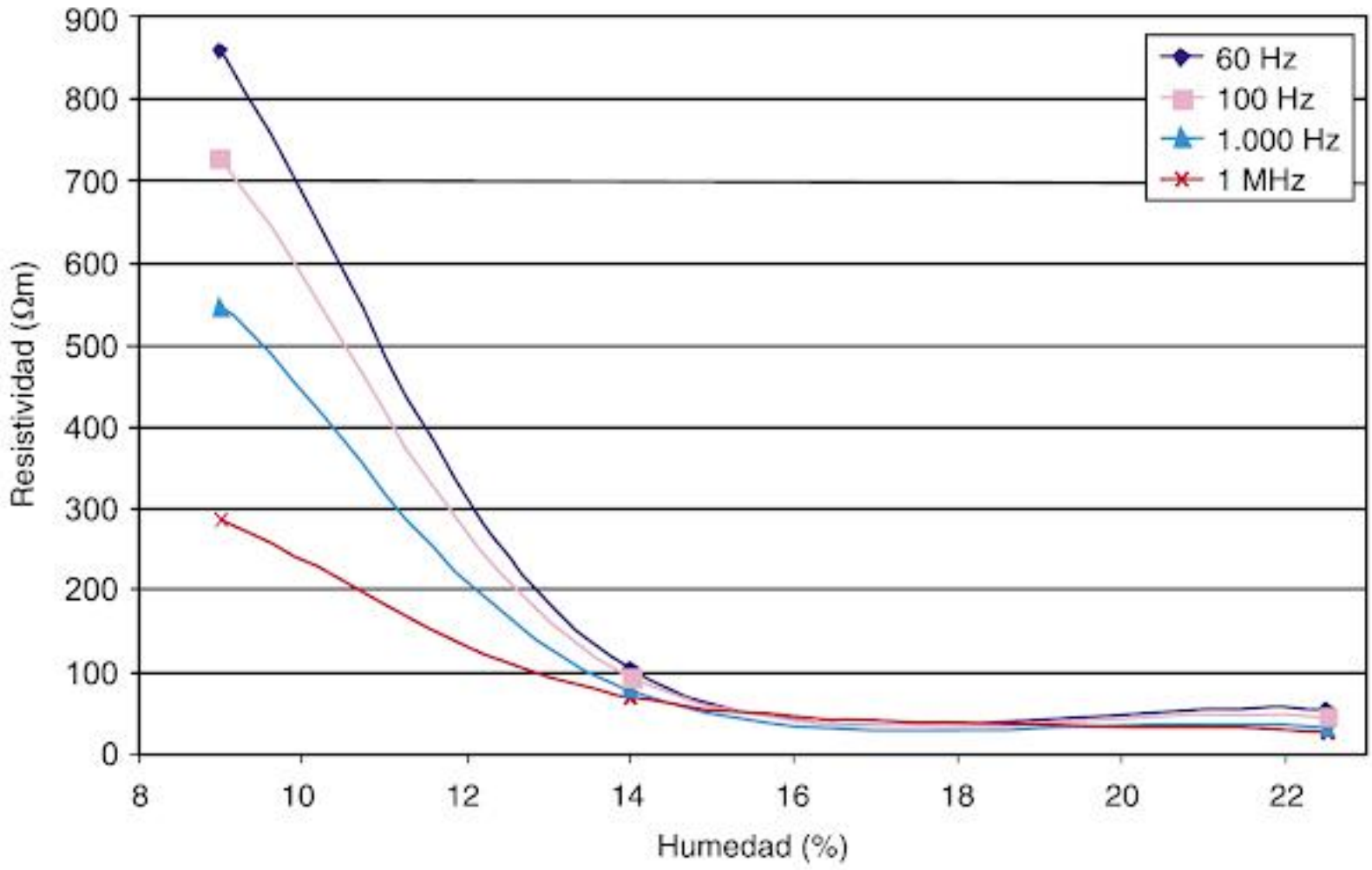

Figura 2.2 Variación de la resistividad del suelo con respecto a la humedad a diferentes frecuencias

2.1.3 La compactación del suelo

Un suelo compacto presenta mayor continuidad y, por tanto, menor resistividad; con el aumento de la presión sobre el terreno hay mayor compactación. Si la granulometría del suelo es gruesa tiende a aumentar la resistividad, dado que disminuye la retención del agua y, además, al haber menor contacto entre los granos hay menor continuidad eléctrica.

2.1.4 La temperatura del suelo

Un aumento de temperatura, dentro de rangos normales de temperatura ambiente, influye sobre la velocidad de movimiento de los iones, al facilitar la conducción eléctrica (tendencia de la curva 3 en la figura 2.3) y, por tanto, disminuye la resistividad. Sin embargo, una temperatura más elevada, cercana a los 100 °C, provoca evaporación, disminuye la humedad del suelo y aumenta la resistividad. Al bajar la temperatura, debe notarse también el salto en aumento de resistividad, al alcanzar 0 °C, debido al aparecimiento del hielo, el cual tiene una alta resistividad, asociada a su carácter cristalino.

La modelación del suelo es un paso fundamental para el diseño de puestas a tierra y el análisis de su comportamiento. Para bajas frecuencias, el suelo estratificado en capas horizontales homogéneas es una buena alternativa (dos, tres o más capas):

Copyrighted material

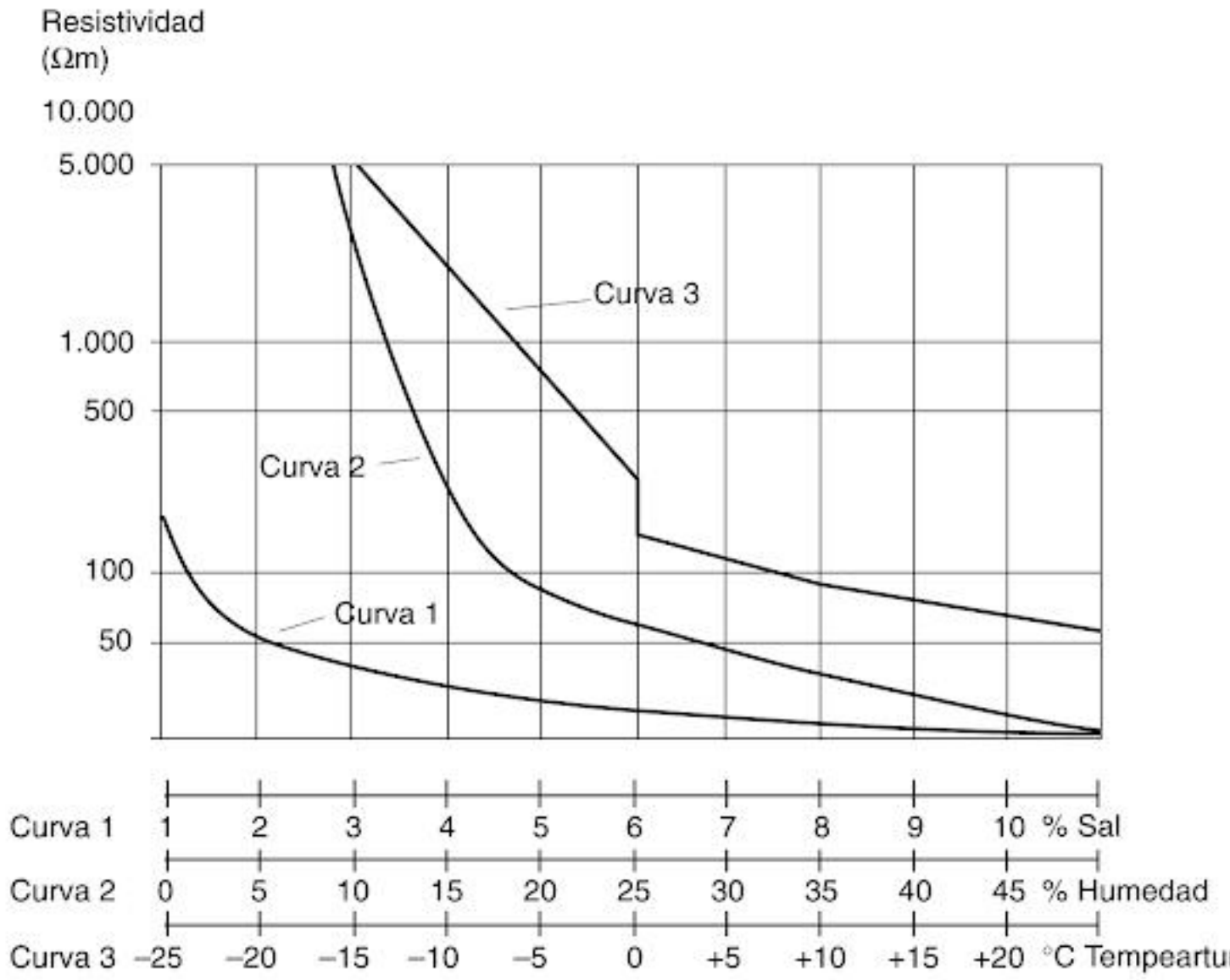

Figura 2.3 Ilustración de variaciones de resistividad por diversos factores

Fuente: adaptada de IEEE Std 80 2000: 50.

para respuestas ante impulsos y altas frecuencias es fundamental tener en cuenta la variación de los parámetros con la frecuencia (Tagg, 1964; Llaverias, De la Casa y Trabalon, 1990; Moreno, Valencia y Cárdenas, 2001).

2.2 La permitividad eléctrica o constante dieléctrica (ε)

Es una medida de la facilidad de polarización de un material en un campo eléctrico (dipolos atómicos y moleculares). Cuantifica el efecto del medio sobre las fuerzas de atracción de dos placas cargadas con polaridad diferente. La unidad de medida es faradio/metro [F/m]. Como se anotó atrás, es expresada frecuentemente por su valor relativo con respecto a la de vacío: $\varepsilon_r = \varepsilon / \varepsilon_0$, donde ε_0 es la permitividad del vacío. A menos que se especifique de otra forma, en este trabajo se hará referencia a la permitividad relativa, aun sin subíndice.

La permitividad posee importancia al estudiar los fenómenos transitorios, debido a la variación de este parámetro con la frecuencia y el contenido de humedad (véase figura 2.4), lo que influencia la propagación de la corriente en el suelo.

Copyrighted material

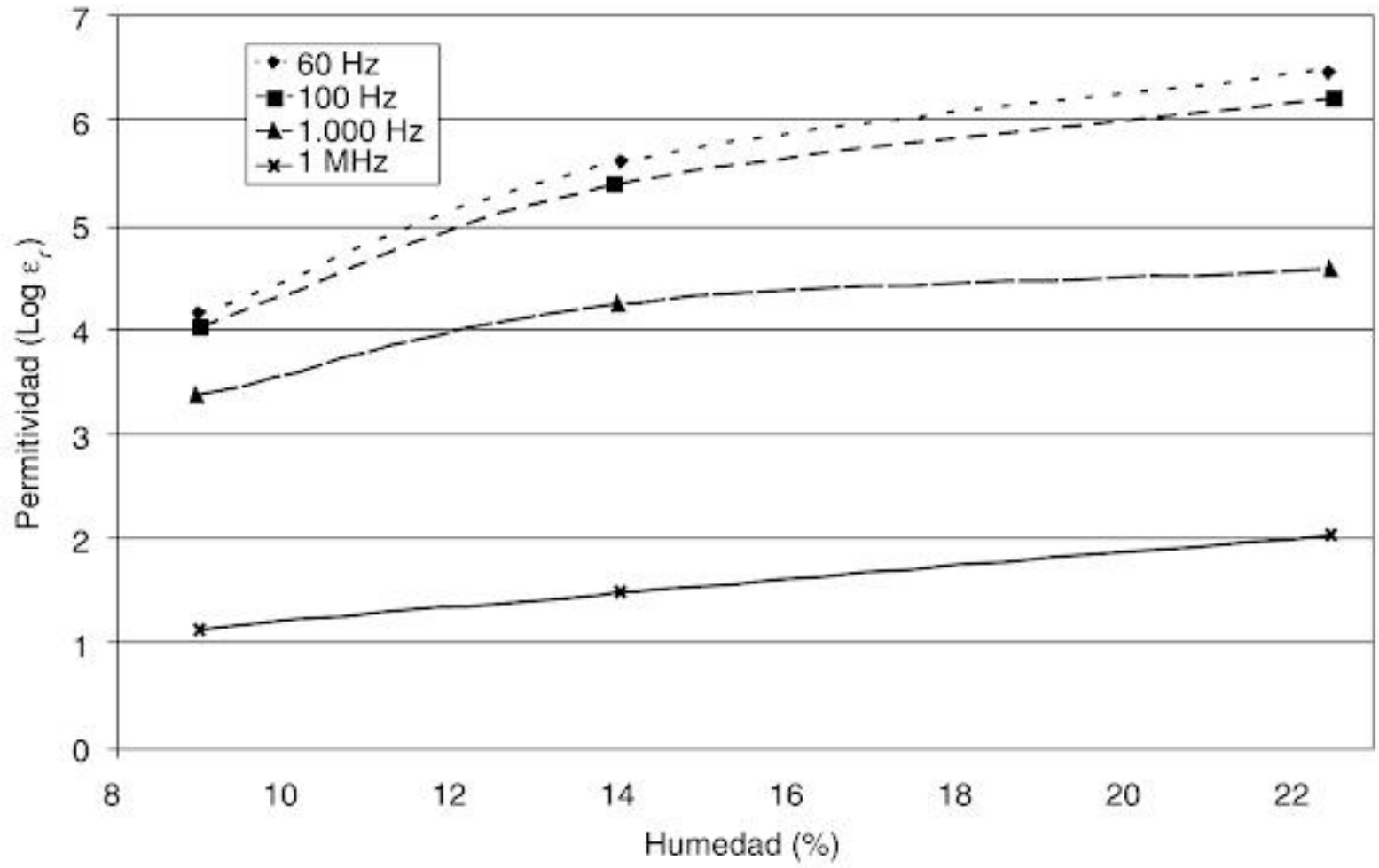

Figura 2.4 Variación de la permitividad con la humedad a diferentes frecuencias

2.3 La permeabilidad magnética (μ)

La permeabilidad magnética (μ) es la relación entre la inducción magnética y la intensidad de campo magnético. En la mayoría de las aplicaciones de los sistemas de puestas a tierra no es un factor determinante, pues en los suelos presenta un valor muy cercano al del vacío y por tal motivo se asume $\mu_r = 1$.

2.4 Parámetros eléctricos en función de la frecuencia

Como se ha anotado a lo largo del capítulo, los parámetros eléctricos del suelo varían con la frecuencia. Esta variación se manifiesta significativamente en variables críticas del comportamiento de las puestas a tierra ante excitaciones impulsivas o de alta frecuencia, como la impedancia o las tensiones que aparecen en el suelo o en los equipos puestos a tierra. En el capítulo 10 se ilustra claramente el efecto de esa variación, relacionado con diversas aplicaciones. A continuación se muestran las figuras 2.5 y 2.6 que ejemplifican las variaciones de ρ y ε_r con la frecuencia y la humedad (Visacro, 1992; Sternberg y Levistkaya, 2000, 2001).

2.5 Referencias bibliográficas

Casas, F., 2005, *Tierra - Soporte de la seguridad eléctrica*, 3.ª ed., Bogotá, Icontec.

Copyrighted material

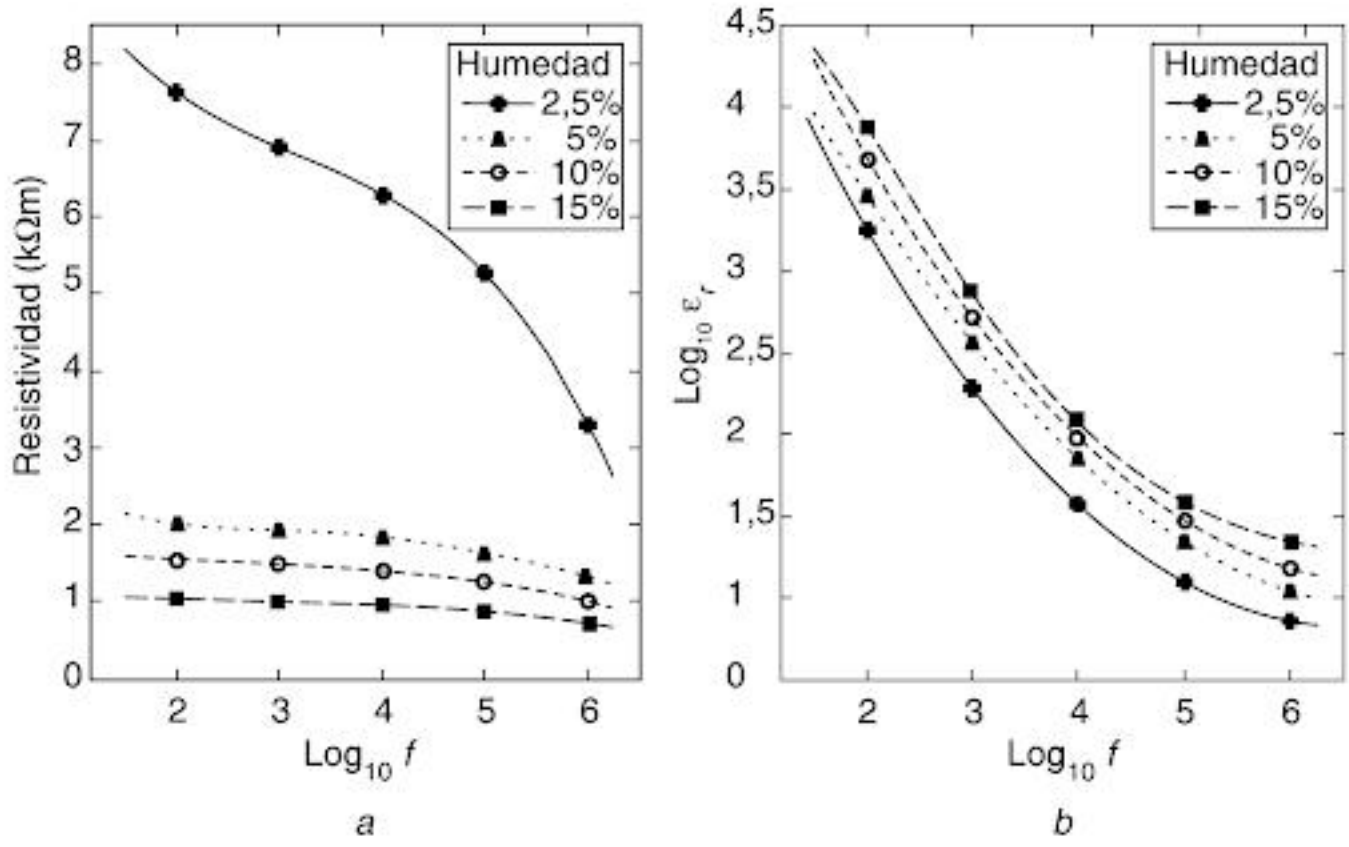

Figura 2.5 Variación de parámetros eléctricos del suelo arenoso con la frecuencia. *a*. Resistividad; *b*. permitividad

Fuente: adaptada de Visacro (1992).

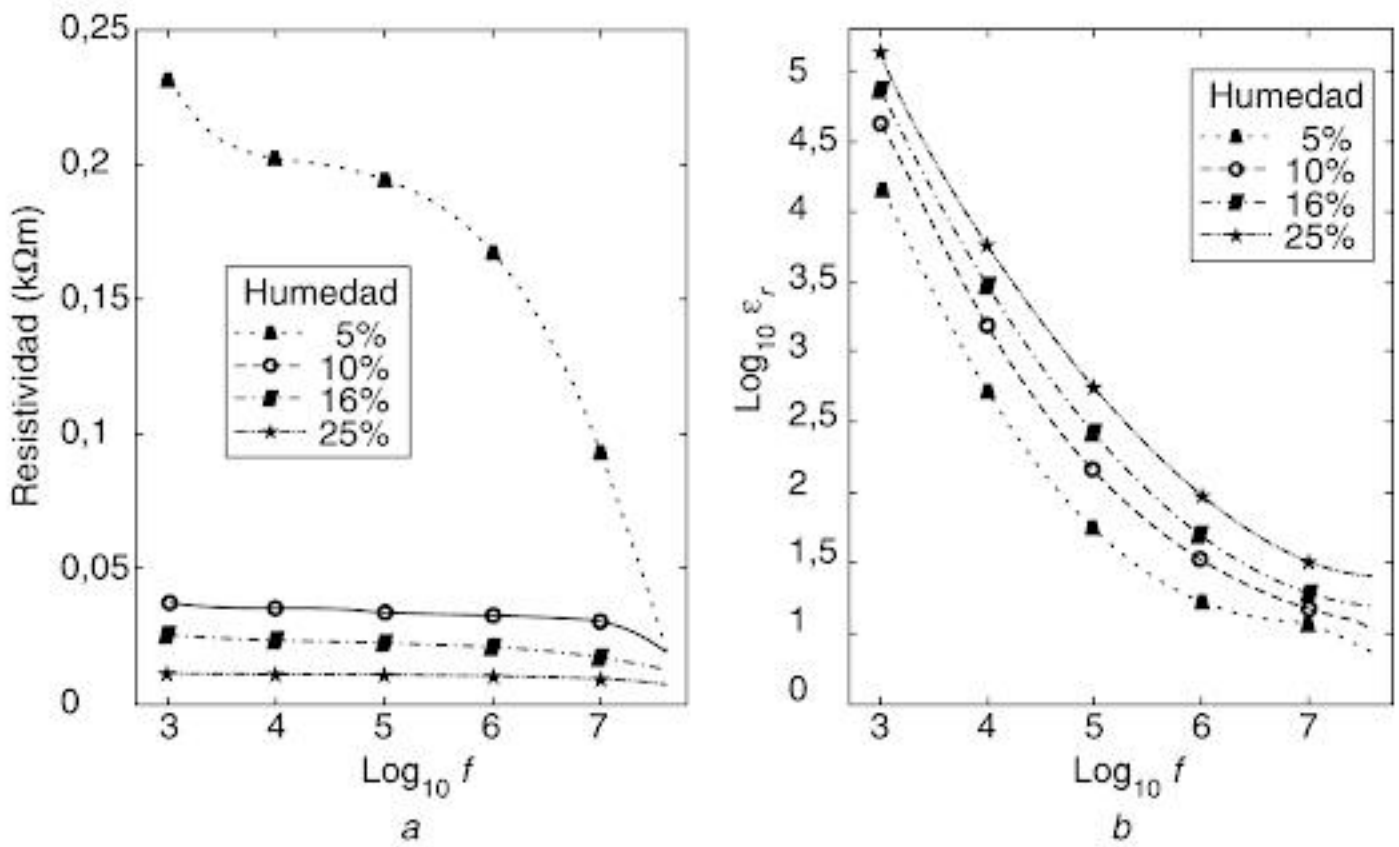

Figura 2.6 Variación de parámetros eléctricos del suelo del Valle de Avra con la frecuencia. *a*. Resistividad; *b*. permitividad

Fuente: adaptada de Sternberg y Levistkaya (2000 y 2001).

Copyrighted material

Gómez, D. y E. Velilla, 2002, "Modelación de puestas a tierra para evaluación de sobretensiones transitorias", Proyecto de grado, Universidad de Antioquia, Medellín.

Henao, J. y H. Ramírez, 1990, "Variación de resistividad y permitividad de suelos con la frecuencia", Proyecto de grado, Universidad de Antioquia, Medellín.

IEEE Std 80, 2000, *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*", enero.

Llaverias, J., C. Trabalon y A. De la Casa: 1990, *Aplicación del método de la inversión generalizada al estudio electrocinético del comportamiento de terrenos por modelización bicapa*, Barcelona, EUITI.

Moreno, G., 1990, "Projeto de Aterramento de Subestações Combinando Métodos Simplificado e de duas Camadas", I Seminário Internacional de Distribuição de Energia Elétrica, I SIDEE, Belo Horizonte.

Moreno, G., J. Valencia y C. Cárdenas, 2001, *Puestas a tierras en sistemas eléctricos de distribución*, Medellín, CESET, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.

ACIEM, 1988, Seminario taller "Puestas a tierra" – *Capítulo Cundinamarca. Módulo III. Diseño, construcción y recepción de un SPT*, Bogotá.

Sternberg, B. K. y T. M. Levistkaya, 2000, "Laboratory measurement of material electrical proprieties: extending the application of lumped-circuit equivalent model to 1 GHz", *Radio Science*, vol. 35, núm. 2, mar.-abr., pp. 371-383.

_____, 2001, "Electrical parameters of soil in the frequency range from 1 kHz to 1 GHz, using lumped-circuit methods", *Radio Science,* vol. 36, núm. 4, jul.-ago. pp. 709-719.

Tagg, G. F., 1964, *Earth Resistances*, Gran Bretaña, Whitefriars Press.

Villa, W. y A. Moreno, 2005, "Caracterización de parámetros eléctricos del suelo en función de la frecuencia. Algunas aplicaciones utilizando técnicas de inteligencia artificial, proyecto de grado, Universidad de Antioquia, Medellín, agosto.

Visacro, S., 1992, "Modelagem de aterramentos eléctricos", tesis de doctorado, Universidad Federal de Río de Janeiro, julio.

Visacro, S., 2002, *Aterramentos eléctricos*, São Pablo, Brasil. Artliber.

Copyrighted material

3

Medición de resistividad y modelación del suelo

Realizar un diagnóstico de la capacidad conductiva del terreno, para lo cual se llevan a cabo las mediciones de resistividad, es el primer paso en el diseño de los sistemas de puesta a tierra, y el valor encontrado es uno de los principales factores que definirán la facilidad y la forma como se distribuirá la corriente en el suelo, determinando a su vez, la distribución de potenciales en éste, y con ello las características constructivas que debe tener la malla de puesta a tierra para cumplir con las condiciones mínimas de seguridad en el área dispuesta para su construcción.

Tales mediciones, junto con la de resistencia de puesta a tierra, se basan en los métodos de prospección eléctrica o geoeléctricos, que son realizados en la superficie del suelo, y en los cuales se hace pasar una corriente eléctrica a través del terreno, al tiempo que se mide la caída de tensión entre dos puntos del terreno por medio de un par de electrodos ubicados en puntos que estarán determinados por la metodología que se esté aplicando. El equipo utilizado debe permitir la obtención de la resistencia aparente del suelo o de la resistividad del mismo, característica que poseen los telurómetros digitales, aunque es posible realizar tales mediciones con otro tipo de equipos de características similares y que son validados por las normas ANSI/IEEE Std 81 (1983) e IEEE Std 81.2 (1991) para tales fines.

Para las metodologías reseñadas en el presente capítulo es común y conveniente el uso de telurómetros digitales, ya que son equipos construidos con este propósito y filtran los ruidos provenientes de la tierra o de las instalaciones eléctricas adyacentes al punto de medición, que pueden afectar la medida.

Los métodos para obtener la resistividad se diferencian entre sí por el número de electrodos utilizados y su disposición relativa. Cada uno de esos métodos busca la solución de determinados problemas geológicos o físicos para la medición de la resistividad, que se presenten en el sitio en que se requiere obtener el valor de ese parámetro, con el fin de diseñar el sistema de puesta a tierra. Según el número de tomas de tierra (electrodos que se entierran para lograr las mediciones necesarias en el método respectivo) de la configuración, pueden ser de cuatro electrodos, de tres

Copyrighted material

o de dos. Aunque existen numerosos métodos, los más aceptados y que sugiere la norma ANSI/IEEE Std 81 (1983) son los de Wenner (1915), Schlumberger-Palmer (Tagg, 1964) y el de medición de resistencia, los cuales se desarrollarán en las siguientes secciones. Todos estos arreglos y sus posibles variaciones, salvo en los casos en que se diga lo contrario, son para suelos homogéneos y, debido a que son ampliamente divulgados en la literatura, sólo se esbozarán para ilustración del lector.

3.1 Resistividad aparente

Según los análisis del método de los cuatro electrodos, el valor de la resistividad eléctrica obtenida es el real para suelos homogéneos, o en aquellos casos en los cuales las heterogeneidades se encuentran a una distancia muy grande de los electrodos de emisión (o de inyección de corriente) y medición (o de lectura de tensión).

En condiciones reales, la corteza terrestre se compone de distintas capas y la profundidad de penetración de las corrientes inyectadas para la medición depende de la distancia entre los electrodos de emisión y de las heterogeneidades del terreno. Así, el valor de ρ obtenido no es la resistividad verdadera, sino un indicador de las resistividades del suelo y de la profundidad de penetración de la corriente. Este valor de ρ se denomina *resistividad aparente* (ρ_a), que es la que obtenemos con estos métodos de medición, y por esto se generaliza:

$$\rho_a = K \frac{\Delta U}{I},$$

donde:

ρ_a: resistividad aparente [Ωm],

K: coeficiente del arreglo [m],

ΔU: diferencia de potencial, medida entre los electrodos M y N [V] (véase figura 3.1),

I: corriente eléctrica circulando entre los electrodos A y B [A] (véase figura 3.1).

En el caso particular de un medio homogéneo, la resistividad aparente coincide con la resistividad verdadera, $\rho_a = \rho$.

Midiendo la resistividad aparente, se obtienen datos sobre la estructura de la parte superior de la corteza terrestre. Prácticamente todos los métodos de medición de resistividad de suelos están basados en el estudio de la resistividad aparente. Los suelos homogéneos no son muy comunes, debido a los procesos naturales de conformación, que generalmente producen capas de diferentes materiales.

3.2 Método de Wenner

La metodología planteada por Frank Wenner en 1915, consiste en ubicar los electrodos en línea recta e igualmente espaciados, como se ilustra en la figura 3.1.

En este sondeo se deben separar progresivamente los electrodos de corriente y de tensión, con respecto a un punto central fijo, denominado *punto de máxima exploración.*

Para el cálculo de la resistividad aparente del suelo, se utiliza la fórmula:

Copyrighted material

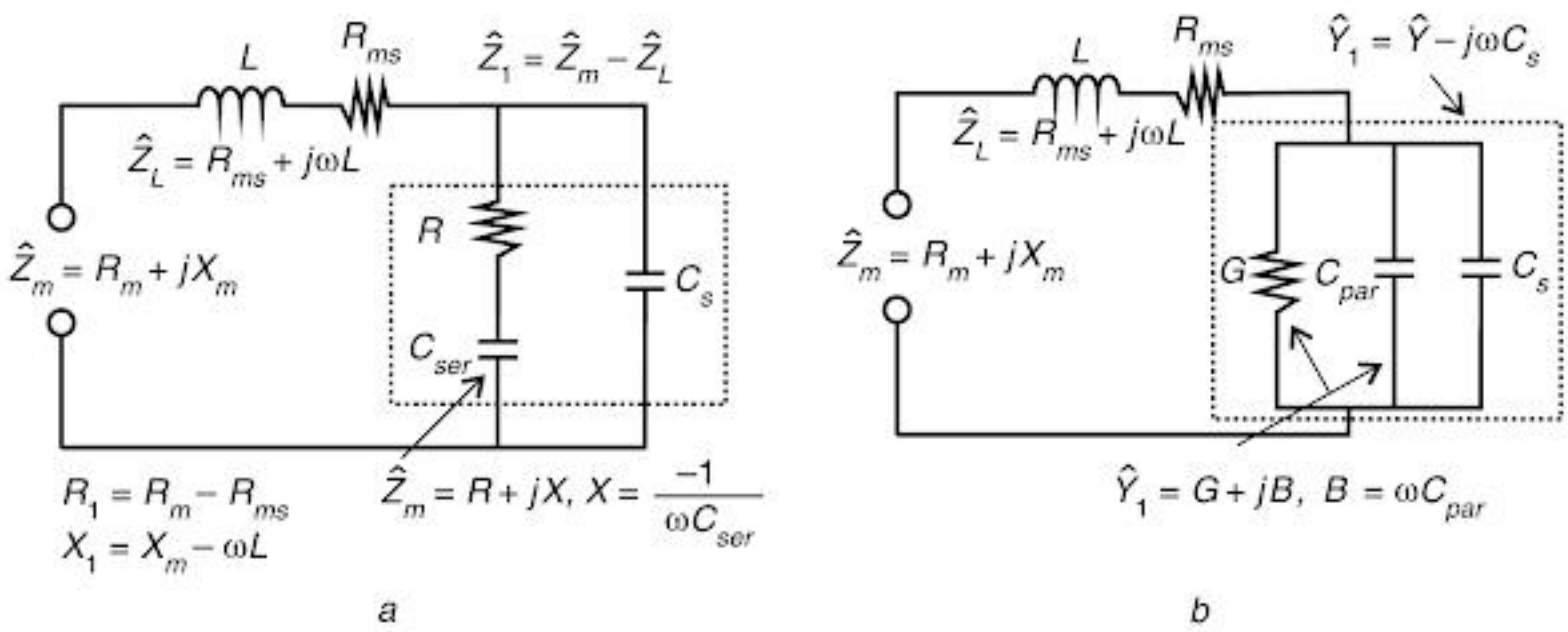

Figura 3.4 Modelos de circuito equivalente del sistema de medida. *a*. Serie; *b*. paralelo.

Fuente: Sternberg y Levistkaya, (2000).

El ángulo δ es el complemento del ángulo de fase ϕ y, por tanto:

$\tan \delta = 1 / \tan \phi$.

El ángulo δ es ampliamente utilizado para caracterizar los dieléctricos por el factor de pérdidas o tangente δ. El factor de pérdidas se puede expresar a través de valores reales σ' y ε' (circuito paralelo), así:

$$\tan \delta = \sigma' / \omega \varepsilon' \varepsilon_0.$$

En general, la permitividad dieléctrica definida para los dos modelos circuitales es diferente: $\varepsilon'_{ser} \neq \varepsilon'_{par}$.

Por otra parte, la conductividad y la resistividad ya no son una la inversa de la otra ($\rho' \neq 1/\sigma'$) y sus valores se relacionan de la siguiente forma:

$$\varepsilon'_{ser} = \varepsilon'_{par}(1 + \tan^2 \delta) \qquad \rho' = \frac{1}{\sigma'\left(1 + \frac{1}{\tan^2 \delta}\right)}.$$

Sólo para dieléctricos muy buenos las permitividades son iguales ($\varepsilon'_{ser} = \varepsilon'_{par}$), con $\tan \delta \ll 1$. Y solamente para materiales conductivos con $\tan \delta \gg 1$ se cumple que $\rho' = 1/\sigma'$.

3.8.1.1 Corrección de la dispersión de los parámetros en el sistema de medida

Los resultados de las medidas son usualmente afectados por la inductancia L y la resistencia R_{ms} del sistema de medida, especialmente en altas frecuencias, constituyéndose una impedancia de dispersión $Z_L = R_{ms} + j\omega L$, la cual se debe restar de

Copyrighted material

la impedancia medida por los instrumentos, $\hat{Z}_m$, con su resistencia y capacitancia medida (R_m, C_m).

$$\hat{Z}_1 = \hat{Z}_m - \hat{Z}_L = R_1 + jX_1,$$

donde:

$$R_1 = R_m - R_{ms}$$
$$X_1 = X_m - \omega_L$$

$$C_L = \frac{C_m}{1 + \omega^2 L C_m}.$$

R_1 y C_L son la resistencia y capacitancia de la muestra, corregida la dispersión. También tan δ puede ser corregida para los valores L y R_{ms}.

$$\tan\delta_L = \frac{\tan\delta_m - \omega R_m C_m}{1 + \omega^2 L C_m},$$

donde tan δ_L es el factor de pérdidas dieléctricas corregido. Adicionalmente se debe tener en cuenta la capacitancia de dispersión del recipiente de la muestra (C_s) para ser sustraída de C_L y obtener la capacitancia verdadera. C_s afecta también la medida de Z_m y el ángulo de fase ϕ_m de la impedancia. Esta consideración debe ser tenida en cuenta para el circuito equivalente tanto en serie como en paralelo:

- Para el circuito en serie, se llega a las siguientes ecuaciones, que permiten el cálculo de la resistencia y la reactancia de la muestra:

$$R = \frac{R_1}{1 + 2\omega C_s X_1 + \omega^2 C_s^2 \left(R_1^2 + X_1^2\right)},$$

$$X = \frac{X_1 + wC_s \left(R_1^2 + X_1^2\right)}{1 + 2\omega C_s X_1 + \omega^2 C_s^2 \left(R_1^2 + X_1^2\right)}.$$

Estos son los valores reales de resistencia R y de reactancia X de la muestra. Entonces, tan $\delta = R / X$ y el ángulo de desfase queda definido. Los parámetros de la muestra, como ρ', ε' y σ', pueden ser ahora obtenidos.

- Para el circuito equivalente en paralelo se llega a las siguientes ecuaciones:

$$G = \frac{R_1}{R_1^2 + X_1^2},$$

$$B = \frac{X_1}{R_1^2 + X_1^2} + \omega C_s.$$

Estos son valores reales de conduntacia G y susceptancia B de la muestra, con los cuales se puede calcular la capacitancia y la resistencia de la muestra y, consecuentemente, los parámetros eléctricos del suelo (ρ', ε' y σ').

El cálculo de la capacitancia del contenedor de la muestra (C_s) está relacionado directamente con el tipo de montaje de la medición, la cual depende de la capacitancia en los bordes del contenedor y la propia capacitancia de celda.

Copyrighted material

Se puede llegar a una buena estimación con métodos como elementos finitos o semiempíricos (Scott y Curtis, 1939, citado por Sternberg, 2000).

3.8.1.2 Medición con electrodos de disco

Se usan dos electrodos en forma de disco, los cuales se introducen dentro de un contenedor, y se comprime el terreno suavemente mediante una prensa, para que la muestra se asemeje a las condiciones reales; esto se ilustra en las figuras 3.5*a*, y 3.5*b*, donde también se muestra cómo se conectan los electrodos a los contactos (láminas de plata) de salida para hacer las mediciones (Sternberg y Levitskaya, 2000).

Las expresiones para calcular los parámetros eléctricos son:

$$\rho' = \frac{\pi d^2 R}{4h} \qquad \sigma' = \frac{4hG}{\pi d^2} \qquad \varepsilon'_r = \frac{4hC}{\pi d^2 \varepsilon_0},$$

donde h es el espesor de la muestra y d es el diámetro del disco. R, G y C fueron descritos en la sección 3.8.1.1

Es necesario apantallar a tierra para evitar capacitancias parásitas en la medición, las cuales son muy frecuentes entre 40 y 100 MHz y producen resonancias en la curva de impedancia. Las dimensiones de la muestra siguen la fórmula: $r < 0{,}038\ (\lambda / \sqrt{\varepsilon'})$; donde r es el radio de la muestra, ε' es la permitividad dieléctrica relativa y λ es la longitud de onda en el espacio libre. La muestra no puede tener un radio mayor al de los discos y, por otra parte, no es práctico hacer mediciones a muestras con radios demasiados pequeños; por tal motivo, las mediciones se hacen a alrededor de 80 MHz.

Con este método se realizaron medidas en el Valle de Avra, en la Universidad de Arizona, cuyos resultados se presentan en la figura 3.6 (Sternberg y Levitskaya, 2001).

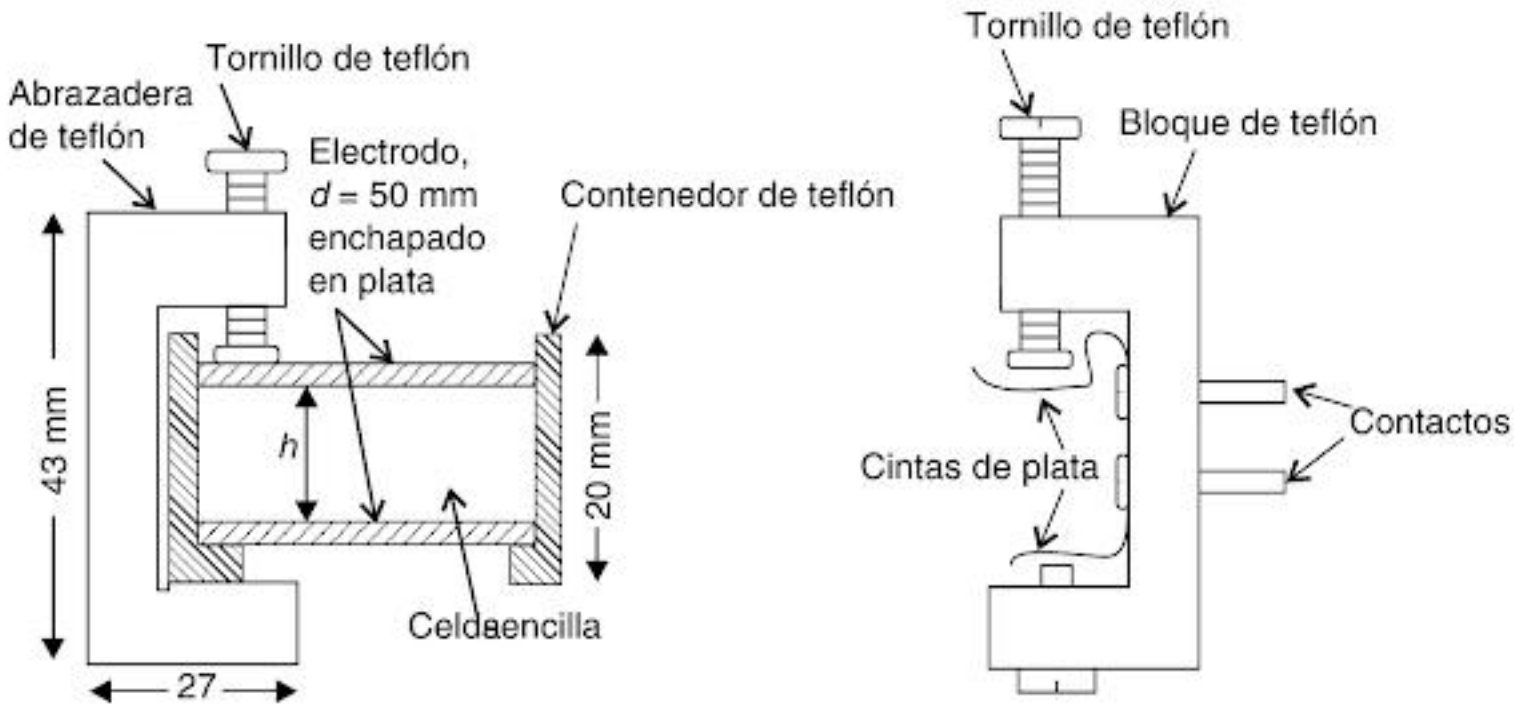

Figura 3.5 Electrodos de disco para mediciones de resistividad y permitividad

Fuente: Stemberg y Levistkaya (2000).

Copyrighted material

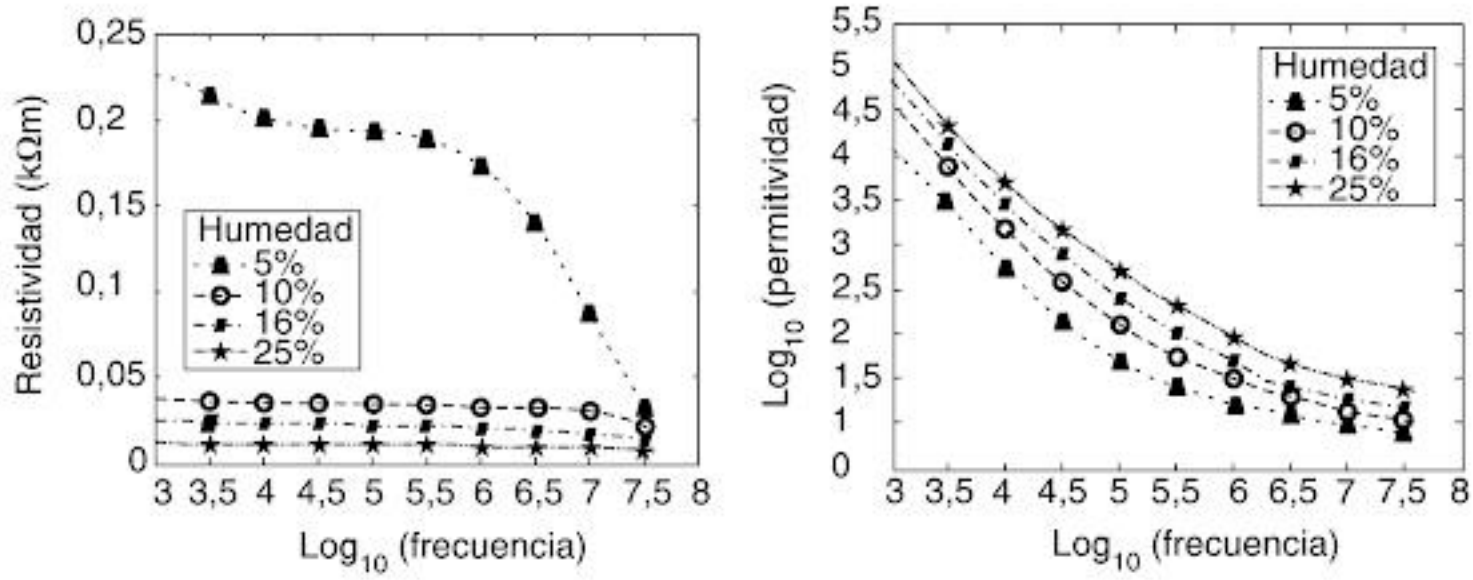

Figura 3.6 Resistividad y permitividad de terrenos de Arizona, en función de la frecuencia

3.8.1.3 Medición con cilindros coaxiales

Con base en esta sencilla configuración se pueden obtener ρ y ε de muestras de suelo, en función de la frecuencia (Henao y Ramírez, 1990; Visacro, 1992; Sternberg y Levitskaya, 2001). La muestra debe ser uniforme y puede manipularse adecuadamente para diferentes humedades. En la Universidad de Antioquia (Henao y Ramírez, 1990) se hicieron mediciones para veintiséis valores de frecuencia entre 40 Hz y 2 MHz, se usaron tensiones senoidales entre 8 y 20 V, y se estiman errores por debajo del 5%. Las expresiones para calcular los parámetros eléctricos son:

$$\rho' = \frac{2\pi HR}{Ln\left(\frac{b}{a}\right)},$$

$$\sigma' = \frac{GLn\left(\frac{b}{a}\right)}{2\pi H},$$

$$\varepsilon_r' = \frac{CLn\left(\frac{b}{a}\right)}{2\pi H\varepsilon_0}.$$

donde H es la longitud del cilindro y a, b son el radio externo e interno del cilindro respectivamente (véase figura 3.7). Adicionalmente, se mantiene la dependencia de la geometría y de las dimensiones del montaje para el cálculo de los parámetros.

Se obtuvieron valores de resistividad según lo mostrado en la figura 3.8.

Trabajos previos (de Visacro y Portela, 1987; 1988; Visacro y Pereira, 1989; Visacro, 1992) reportan mediciones similares.

El método mencionado se utiliza cuando $\lambda_{lim} > \pi\sqrt{\varepsilon'}\,(b + a)$, donde a y b son el radio interior y exterior del cable coaxial, y el rango de medida puede llegar hasta 1 GHz, dependiendo de la permitividad dieléctrica de la muestra del terreno.

Copyrighted material

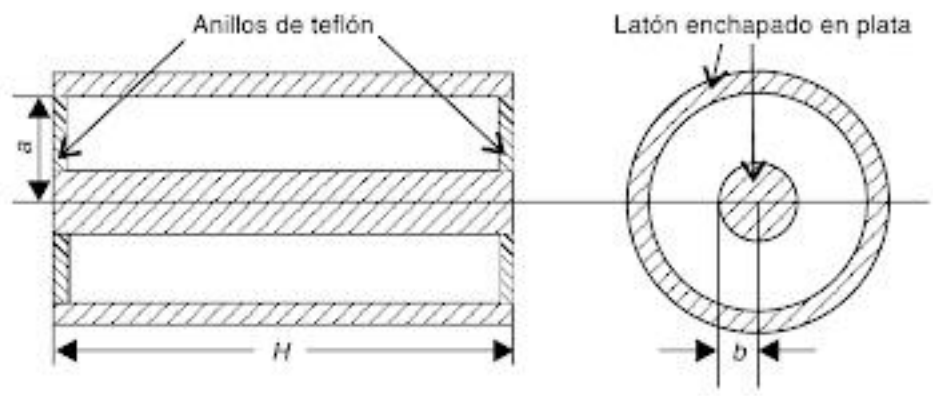

Figura 3.7 Cilindro coaxial usado para las mediciones de resistividad y permitividad.

3.8.1.4 Otros métodos de medición de parámetros y su variación con la frecuencia

En la literatura se encuentran otros métodos para mediciones de conductividad efectiva $\sigma_e(\omega)$ y permitividad dieléctrica $\varepsilon_e(\omega)$, aplicables principalmente en rocas, por lo que aquí apenas se mencionan: el método de celdas con dos electrodos, el de celdas con cuatro electrodos, el de bobinas de inducción, el de torsión y el del medidor de permitividad con radio frecuencia, cada uno de los cuales se adapta mejor a cierto rango de frecuencias (Brent y Word, 1970).

3.9 Interpretación de las medidas. Modelos de suelo

Entre los diversos perfiles de ρ_a obtenidos, debe seleccionarse el valor de resistividad con el que se procederá al diseño. Este valor será necesario para calcular la resistencia

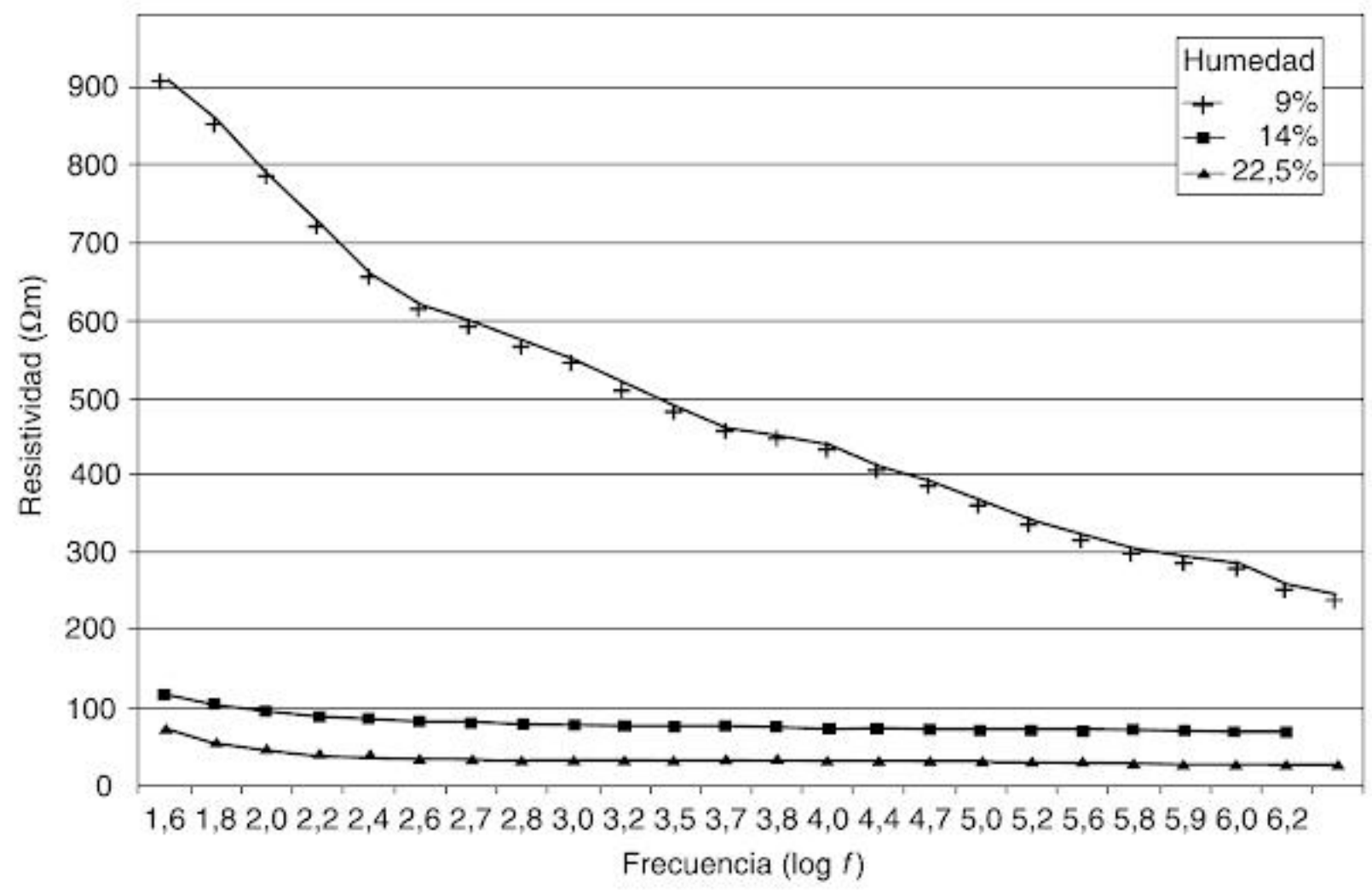

Figura 3.8 Mediciones de la resistividad en laboratorio, a diferentes humedades del terreno

Copyrighted material

de puesta a tierra y la distribución de potenciales en la superficie del suelo, valores estos que serán los indicadores fundamentales del comportamiento del SPT en baja frecuencia. Pero, como se ha anotado atrás, el suelo no es un material homogéneo y las resistividades medidas son apenas aparentes. Esta característica del suelo obliga a asumir un modelo que permita una formulación del fenómeno de inyección de corriente a través de la puesta a tierra, que sea suficientemente sencillo para viabilizar los cálculos, pero cuyas simplificaciones no acaben convirtiendo los resultados en mera fantasía. De todas formas, la constitución real del suelo se manifiesta en los valores medidos de resistividad y la primera información de referencia será, entonces, el perfil ρ_a frente a a; sin embargo, como se tienen varios perfiles levantados en las mediciones, se debe obtener uno que sea representativo del conjunto. Éste puede resultar de los promedios aritméticos de los valores correspondientes a iguales valores de a (separación de electrodos), o de algún otro indicador promedio (por ejemplo, promedio logarítmico).

Dos modelos de suelo han sido los más utilizados para los fines anotados: suelo homogéneo y suelo constituido por dos capas horizontales homogéneas. La relación entre los valores medidos y los modelos se presenta a continuación.

3.9.1 Suelo homogéneo

Se considera que el modelamiento del suelo como homogéneo es adecuado cuando los valores medidos no se apartan en más de un 30% del valor máximo de los mismos (IEEE Std 80, 2000). Se asume, entonces, tal valor medio para la resistividad de un medio homogéneo semiinfinito, cuyo límite superior es la superficie del suelo, y con ese modelo de suelo se procede a realizar todos los cálculos necesarios en el diseño del SPT. Alternativamente puede aplicarse el método de Box-Cox, que busca un valor con probabilidad de 70% de ser el real. Para este modelo se adapta razonablemente la metodología de cálculo y diseño propuesta por la norma IEEE Std 80, aunque con varias restricciones que la propia norma expone y algunas otras que serán comentadas en el capítulo 7.

3.9.2 Suelo a dos capas horizontales

Cuando la condición para asumir suelo homogéneo no se cumple, se procura una aproximación más adecuada a la situación real, mediante un medio (suelo) a dos capas horizontales homogéneas, como se ilustra en la figura 3.9. Como se puede observar, los parámetros de este modelo son la resistividad de la capa externa, ρ_1, su profundidad, h, y la resistividad de la capa profunda, ρ_2.

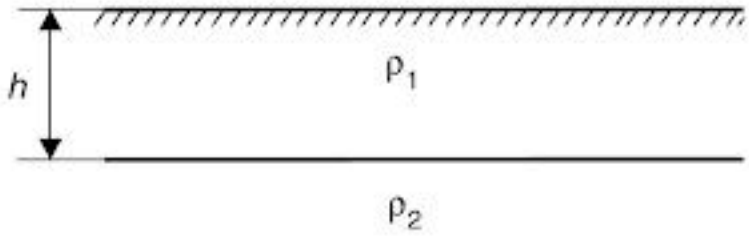

Figura 3.9 Modelo de suelo de dos capas horizontales

Este es un modelo que considera el hecho de que la parte más externa del suelo siente la acción de las condiciones atmosféricas, incluyendo las variaciones

Copyrighted material

estacionales, y en general, del ambiente próximo a la superficie del suelo, creándose una capa relativamente homogénea desde la superficie hasta algunos metros de profundidad. Más al fondo, se encuentra una condición razonablemente estable y homogénea hasta profundidades comparables a la longitud de los electrodos, que es la de interés para el comportamiento eléctrico del SPT.

La figura 3.10 ilustra cualitativamente el comportamiento de la corriente en medios homogéneo y de dos capas horizontales (Loboda, 1999).

3.9.3 Relación entre ρ_a (Wenner) y los parámetros del suelo a dos capas

Como se anotó atrás, el valor de resistividad medido por el método de Wenner sólo es el real cuando el suelo es homogéneo. Sin embargo, se ha estudiado la relación entre ρ_a y los parámetros del suelo de dos capas, lo que permite, con técnicas adecuadas, usar este método para prospección de suelos así constituidos. En efecto, se ha obtenido la relación 3.1 (Tagg, 1964):

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + 4\sum_{n=1}^{n=\infty}\left[\frac{k^n}{\left\{1+\left(2n\frac{h}{a}\right)^2\right\}^{\frac{1}{2}}} - \frac{k^n}{\left\{4+\left(2n\frac{h}{a}\right)^2\right\}^{\frac{1}{2}}}\right] \qquad \frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + 4F, \tag{3.1}$$

donde F es la suma de la serie infinita y

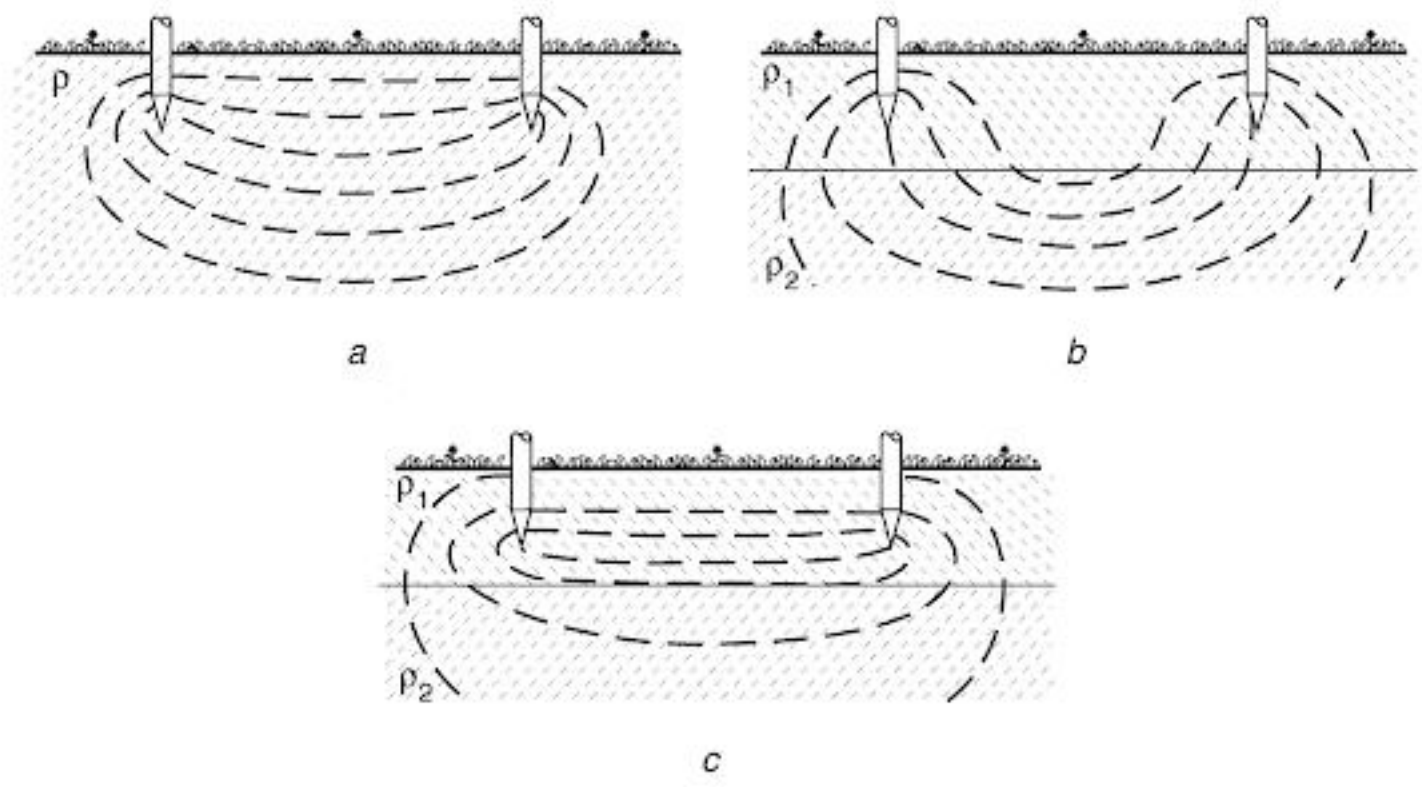

Figura 3.10 Líneas de corriente en suelos a capas. *a*. suelo homogéneo de resistividad ρ; *b*. suelo a dos capas horizontales, $\rho_2 < \rho_1$; *c*. suelo a dos capas horizontales, $\rho_2 > \rho_1$.

Copyrighted material

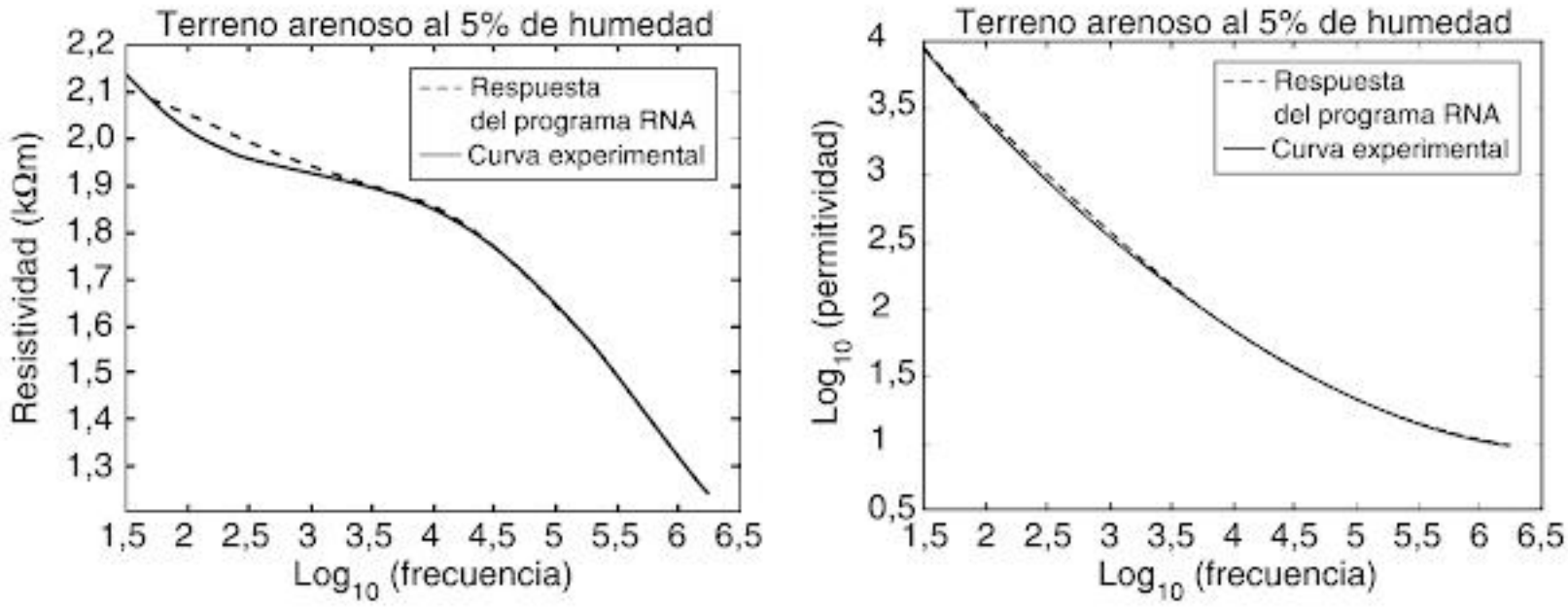

Figura 3.16 Respuesta del caso I

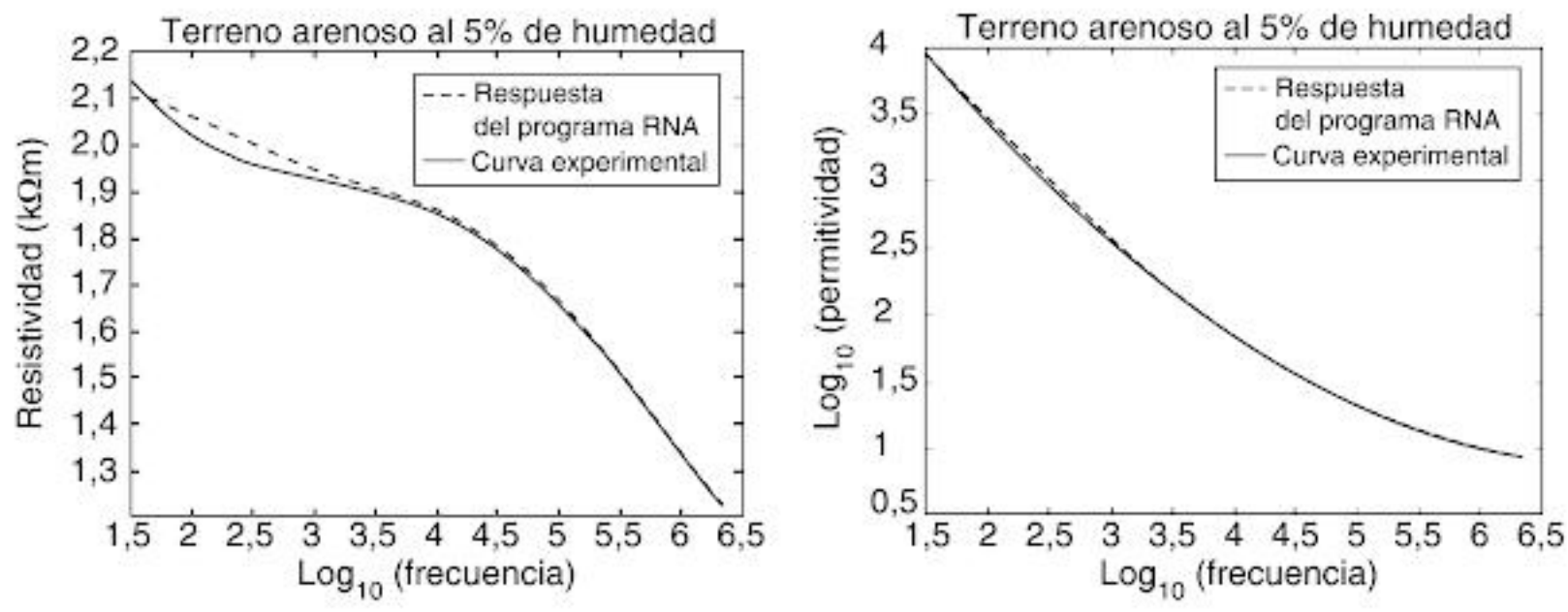

Figura 3.17 Respuesta del caso II

funcionamiento de la RNA *backpropagation* con diversos tipos de suelo y porcentaje de humedad. Los resultados se compararon con la expresión 3.3 y las curvas de comportamiento experimentales, con buenos resultados para el modelo neuronal, que mantiene el comportamiento de las curvas experimentales, en sus respuestas, ante ingreso de nueva información no contenida en el conjunto de entrenamiento inicial.

3.13 Referencias bibliográficas

Ansberry, J., P. Wozniak, y D. Golberg, 1992, "Optimal Hydrogenerator Governor Tuning with a Genetic Algorithm", *IEEE Trans. On Energy Conversion*, vol. 7, núm. 4, dic.

ANSI/IEEE Std 81, 1983, *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground Systems*. Nueva York, USA.

Copyrighted material

4

Impedancia de puesta a tierra

4.1 Resistencia de puesta a tierra

La resistencia de puesta a tierra de un electrodo, para densidades de corriente bajas (que no provoquen ionización del suelo), estacionarias o de baja frecuencia, está constituida por:

a. Su propia resistencia, determinada por el metal que lo compone, y de las conexiones con el sistema eléctrico,

b. la resistencia de contacto entre el electrodo y el suelo, y

c. la resistencia del suelo, desde la superficie del electrodo hasta tierra remota (aquella suficientemente alejada para que la inyección de corriente a tierra, a través del electrodo, no manifieste ningún efecto significativo). Estos componentes se ilustran en la figura 4.1.

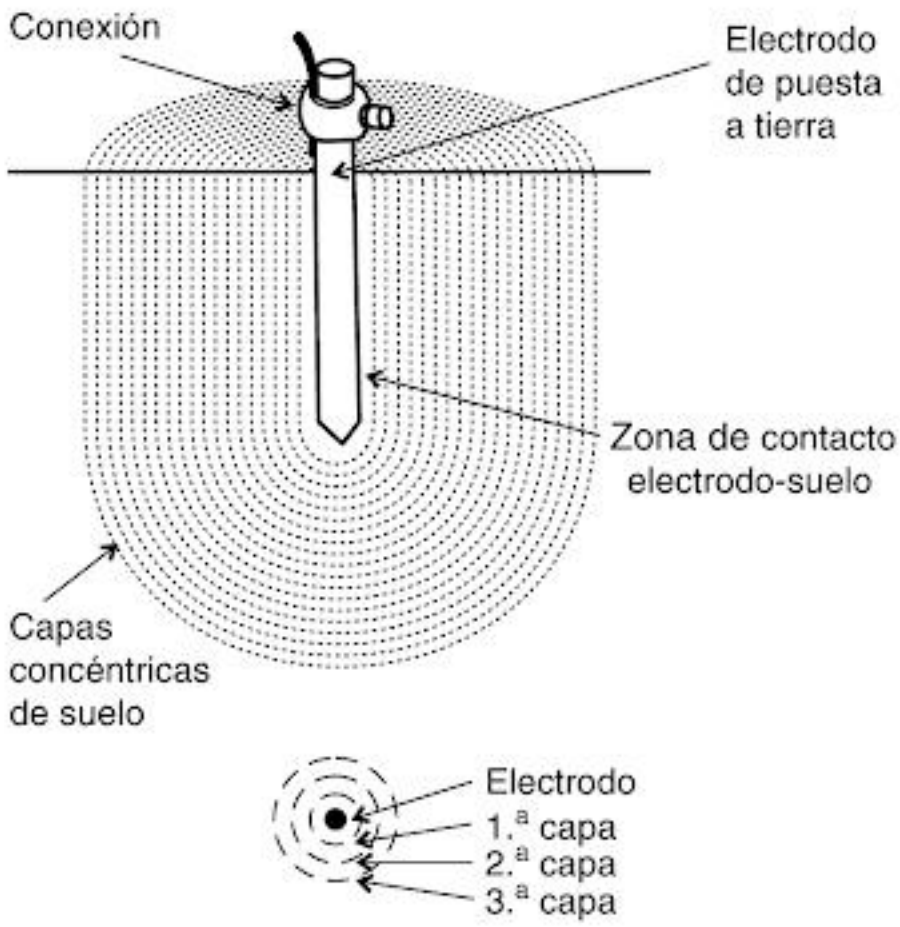

Figura 4.1 Componentes de la resistencia a tierra del electrodo

Normalmente, los componentes *a* y *b* presentan valores mucho más bajos que el componente *c*, es decir, la resistencia de puesta a tierra está constituida esencialmente por la resistencia del suelo circundante al electrodo de puesta a tierra. La resistencia total es la resultante de todas las capas en serie. Ahora bien, como se ilustra en la figura 4.1, a medida que aumenta la distancia al electrodo, las capas de suelo presentan una mayor área transversal a la corriente y, por

Copyrighted material

sólidamente, 2, 6, 185
punto de máxima exploración, 23, 25

R

rayos, 3, 10, 53, 160, 167, 171-173, 176, 184
red(es)
neuronales artificiales, 45, 184
v. t. inteligencia artificial
secuencia, de, 94, 96, 97
resistencia, 4, 8, 14, 15, 22, 28, 27, 30, 32, 35, 50, 51, 53, 62, 67-69, 79, 82, 84, 90, 100, 102, 104, 105, 112, 116, 118, 120-122, 125, 130, 134, 137, 145, 148-150, 182, 183, 185, 187
contacto, de, 50, 74, 120, 121, 149
puesta a tierra, de, 184
tierra, a, 14, 26, 50, 51, 53, 62, 63, 65, 67, 70, 76, 104, 122, 130, 141, 148, 149
v. t. medición(es)
resistividad, 2, 13-18, 22-28, 30, 31, 34-46, 51, 53, 56, 58, 60, 73, 104, 121, 125, 127-129, 140, 142-146, 149-151, 154, 164, 168, 171, 184, 185, 187
aparente, 23-25, 39, 41, 42, 44, 125, 184
mediciones de, *v.* medición(es), resistividad, de
terreno, del, 26, 28, 73, 129, 184
v. t. parámetro(s), eléctricos del suelo
retículo esquinero, 125, 127
ruta promedio, 43

S

sales, 13, 14, 16, 140
contenido de, 16
segmentación analítica, 142
seguridad, 1-5, 10, 11, 22, 74, 85, 108, 113, 138, 150-152, 182
criterios de, 2, 125
equipos, de los, 1
personas, de las, 1, 10, 108
serie, 29, 30, 32, 37, 50, 65, 74, 76, 79, 80, 90, 94, 146
v. t. modelo(s), circuital
simulación, 41, 53, 57, 73, 74, 76, 79, 82, 89, 91, 99, 104, 105, 130, 151-153, 167, 173
sistema(s)
aislado, 89
conectado a tierra mediante impedancia, 89
sólidamente conectados a tierra, 90
sobretensión, 169, 170, 172
modo diferencial, en, 185
soil, *v.* suelo
SPT, *v.* puesta(s) a tierra, sistema de
suelo(s)
artificial, 73
dos capas horizontales, a, 36
homogéneo, 36
modelamiento del, 36
temperatura de los, 17
tipos de, 15, 46, 47, 71
tratamiento de, 140

T

telurómetro, 24-26, 63, 66, 72-74, 185
temperatura, 11, 13, 16, 17, 58, 114, 126, 127, 137, 182
tensión(es)
contacto, de, 11, 12, 62, 74-76, 114, 117-122, 125, 127, 131, 149-153, 159, 185
v. t. medición(es)
paso, de, 12, 75, 76, 116-120, 125, 129, 150, 168, 185
v. t. medición(es)
permisibles, 108
v. t. condiciones seguras; coeficiente, reflexión, de
retículo, de, 75
v. t. medición(es)
tolerables, 75, 115, 130, 131
transferida, 118, 119, 185
teoría de imágenes, 38, 122, 142, 145, 161, 162, 167
terreno, *v.* suelo
tierra
aislada, 185
referencia, de, 184, 185
remota, 50, 51, 64, 67, 69, 182, 185, 186
sistemas sólidamente conectados a, 90
transferencia(s), 6, 55, 118
función de, 55-57
transformación de Box-Cox, 38
transitoria, 53-55, 160, 165

U

unión permanente, *v.* equipotencialidad

V

Vector fitting, *v.* circuitos equivalentes

Copyrighted material

Esta obra recoge temas convencionales de las puestas a tierra, como mediciones y cálculo de resistividad, resistencia a tierra, tensiones permisibles y diseño según la norma IEEE 80. Además, aborda métodos sistematizados modernos con los que se logran modelos de suelo a dos capas, o calcular las puestas a tierra en tales suelos o bajo la solicitación de rayos. Se emplean casos reales y simulaciones con *software* propio, como Matier y GTIERRAS, o *software* comercial reconocido, como EMTP/ATP.

Se destaca la consideración de normatividad reciente, en especial del Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (Retie), de obligatorio cumplimiento en Colombia, así como el tratamiento de la respuesta ante rayos, con herramientas matemáticas avanzadas e inteligencia artificial.

Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra: Respuestas ante fallas eléctricas y rayos es el fruto de más de una década de trabajo del Grupo de Manejo Eficiente de la Energía —GIMEL—, de la Universidad de Antioquia, en que se combina un esfuerzo de rigurosidad con el de ilustrar la aplicabilidad de los conceptos y métodos, en busca de un adecuado balance para orientar hacia una ingeniería confiable y llegar tanto a ingenieros electricistas como a públicos con formación tecnológica, no especializada.

ISBN 978-958-714-057-6

Copyrighted material